(Aus dem Physiologischen Laboratorium der Universitäts-Ohren- und Nasenklinik in der Charité zu Berlin.)

# Über die Tonbildung in den Lippenpfeifen

---

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

Genehmigt

von der Philosophischen Fakultät

der

Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

BIBLIOTHEEK RIJKS UNIV. LEIDEN

Von

**Paul Lutz**

aus Pfullingen in Württemberg.

Tag der Promotion: 21. Mai 1921.

BERLIN 1921
VERLAG VON S. KARGER
KARLSTRASSE 15.

475

Referenten: *Prof. Dr. von Laue*
*Prof. Dr. Stumpf*
*Prof. Dr. Joh. Wolf.*

---

Sonderabdruck aus Passow u. Schaefer, Beiträge Bd. XVII.

---

Druck von Ernst Klöppel, Quedlinburg

Meinem Bruder Karl

dankbarst gewidmet.

Musiker und Akustiker haben der Tonbildung in den Orgelpfeifen von jeher ein besonderes Interesse entgegengebracht, in dessen Vordergrund die Lippenpfeifen stehen. Bei diesen hängt der Ton erstens ab von den Dimensionen der Pfeife, also der Länge, Breite und Tiefe des Pfeifenrohrlumens, zweitens von der Form des Aufschnittes. In letzterer Beziehung sind ausschlaggebend: die Breite der Kernspalte, die Höhe des Aufschnittes, d. h. des Abstandes zwischen der Schneide an der Oberlippe und der Kernspalte, und die Stellung der Schneide gegenüber der ihr stets parallel gerichteten Kernspalte, insofern die Schneide im Verhältnis zur Kernspalte entweder mehr gegen das Innere der Pfeife oder mehr nach außen gerichtet sein kann. Drittens ist die Stärke des Anblasedrucks von wesentlichem Einfluß auf die Tonhöhe.

Bei dem zu Anfang des vorigen Jahrhunderts maßgebenden Akustiker Chladni[1]) ist noch durchaus keine genügende Erklärung für die Tonbildung in Lippenpfeifen zu finden. Er ist der Ansicht, daß die Luft im Pfeifenrohr abgesondert von der atmosphärischen Außenluft zu betrachten sei. Die schnell durch eine enge Anblaseöffnung strömende Luft bewirke eine zitternde Bewegung der Luftsäule im Innern der Pfeifenröhre ihrer ganzen Länge nach. Die Tonhöhe sei durch die Art des Anblasens und durch die Länge der eingeschlossenen Luftsäule bestimmt. Für die Tonhöhe bei Lippenpfeifen komme hauptsächlich die Länge der Luftsäule in Frage. Das zum Anblasen dienende Mundstück sei so angebracht, daß die anblasende Luft, die durch eine enge Ritze gepreßt wird und an dem einen Ende der Luftsäule vorbeistreicht, zum größten Teil wieder durch den nahe der engen Ritze befindlichen Ausschnitt entweiche. Chladni begnügt sich also mit der Erklärung, daß durch das Vorbeistreichen des Luftstromes an dem, an den Ausschnitt grenzenden, Ende der Luftsäule diese in eine longitudinal schwingende Bewegung versetzt wird.

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts hat dann Zamminer[2])

[1]) Die Akustik, Leipzig 1802. § 69 und 71.

[2]) Die Musik und die musikalischen Instrumente in ihrer Beziehung zu den Gesetzen der Akustik. Gießen 1855. S. 208 ff.

schon eine ziemlich präzise Theorie der Tonbildung in Lippenpfeifen zur Darstellung gebracht. Er faßt in seinem Kapitel „Flötenpfeifen und Zungenpfeifen" zunächst die Gesetze der tönenden Luftsäulen zusammen und beweist, daß sich an offenen Enden infolge der Mitteilung des Klanges an die umgebende Luft nur Schwingungsbäuche, an geschlossenen Enden nur Schwingungsknoten bilden können. Die bei schwingenden Saiten und Stäben vorhandene harmonische Obertonreihe weist er auch bei tönenden Luftsäulen nach und setzt die Obertonbildung bei den am einen Ende befestigten Stäben analog der Obertonbildung der tönenden Luftsäulen bei Pfeifen mit einem geschlossenen und einem offenen Ende, während für offene Pfeifen alle harmonischen Teiltöne, geradzahlige und ungeradzahlige, möglich seien, da sich ja an beiden Enden immer ein Schwingungsbauch bilden müsse.

Zamminer erweiterte die Theorie, daß ein Teil der das offene Ende umgebenden Außenluft mit in die stehende Schwingungsbewegung hereingezogen wird, daß sich also die Zurückwerfung der Welle am offenen Ende und die Umkehrung der Welle in die entgegengesetzte Form nicht direkt am offenen Ende vollzieht, insofern, als er Gesetze aufstellte für die Tonveränderung bei Pfeifen mit teilweise gedackten Enden. Er fand, daß bei einer offenen Pfeife der Ton an Stärke und Höhe verliert, je mehr man das eine Ende verdeckt. Kurz bevor der Ton in die tiefere Oktave überspringt, die dann wieder laut hörbar ist, vernimmt man gar keinen Ton. Würde man die durch teilweises Verdecken der einen Mündung entstehenden Übergangstöne von der offenen zur gedackten Pfeife in Kurvenform festlegen, bekäme man eine unstetige Kurve.

Bei den Flötenpfeifen strömt eine Luftlamelle aus einer Spalte gegen eine gegenüberliegende Schneide oder die Luftlamelle ist — wie bei der Querflöte — quer über die Mündung gegen den gegenüberliegenden Rand gerichtet. Zamminer leitet seine Darstellung über die in den Pfeifen durch einen anscheinend ganz gleichmäßig und stetig verlaufenden Luftstrom in Schwingungsbewegung versetzte Luft mit der Wiedergabe eines Versuchs von Savart ein.

Aus einer engen Öffnung eines mit Wasser gefüllten Gefäßes treibe man einen Strahl senkrecht nach unten. Dieser erscheint in der Nähe der Öffnung glatt und durchsichtig, um dann in einigem Abstande von der Ausflußöffnung undurchsichtig und rauh zu werden. Das rauhe Aussehen und die Undurchsichtigkeit erklären sich daraus, daß sich der Strahl nur noch aus einzelnen Tropfen zusammensetzt, deren maximale Durchmesserrichtung periodisch wech-

selt, indem der Durchmesser abwechselnd in der Horizontalen und Vertikalen liegt. Durch diese periodischen Anschwellungen ist schon ein Ton bedingt, da ja die Tropfen p e r i o d i s c h gegen die Luft s t o ß e n. Die Tonhöhe ist eine Funktion der Geschwindigkeit des Wasserstrahls sowie der Weite der Ausflußöffnung. Die Schwingungszahl des Tones wird umso größer, je kleiner die Öffnung und je größer die Geschwindigkeit des Strahles ist. Entspricht die Schwingungsperiode eines nahe dem Wasserstrahl erklingenden Tones der Zeit, die zu der Formveränderung der Wassertropfen nötig ist, so werden die ringförmigen Anschwellungen, durch die die Bildung der Tropfen in dem nahe der Ausflußöffnung befindlichen durchsichtigen Teile des Wasserstrahls schon angedeutet wird, deutlicher sichtbar. Der gegen eine Schneide getriebene Wasserstrahl spaltet sich in zwei Büschel, die um die Schneide Schwingungen vollenden, deren Periode eine Funktion der Geschwindigkeit des Stromes und des Abstandes der Schneide von der Ausflußöffnung ist. S a v a r t bestätigte dieses Gesetz auch für die aus engen Öffnungen ausströmende L u f t, die er, um den Vorgang sichtbar zu machen, vor dem Austritt mit gefärbtem Pulver mischte. Wieder vollführten die beiden Büschel, in die sich der Strahl an der Schneide teilte, periodische Schwingungen, deren Zahl in der Zeiteinheit durch Erhöhen der Geschwindigkeit des Luftstromes und durch Verkleinerung des Schneidenabstandes von der Ausflußöffnung größer wurde.

Diese S a v a r t schen Ergebnisse wandte Z a m m i n e r auf die Lippenpfeifen der Orgel und auf das Pfeifen mit dem Munde an. Auch die aus der engen Öffnung zwischen den Lippen beim Pfeifen mit dem Munde getriebene Luft gerät nach Z a m m i n e r in periodische Erzitterungen, d. h. es entsteht ein Ton. Die Zunge bildet mit der vorderen Mundhöhle den entsprechenden Resonanzraum und v e r s t ä r k t so diesen Ton. Bei der Orgelpfeife entspricht also der Pfeifenkörper unmittelbar über der Oberlippe der resonierenden Mundhöhle, denn die zwei Luftlamellen, in die der aus der Kernspalte getriebene Luftstrom sich an der Oberlippe zerlegt, vollführen periodische Schwingungen und bedingen so schon einen Ton. Durch geringe Verstärkung des Luftstromes wird der Ton, den der Aufschnitt allein gibt, erhöht. Eine Erhöhung des Tones wird auch durch Verringerung des Abstandes zwischen Oberlippe und Kernspalte herbeigeführt.

Die s t e h e n d e n Schwingungen im Pfeifenkörper aber sind gegen kleine Änderungen der Tonhöhe unempfindlich. Wie die

Feder der Uhr nicht immer mit der gleichen Kraft das Pendel bewegt, so ist auch die Intensität des in die Pfeife geschickten Luftstromes nicht immer die gleiche. Die Regelmäßigkeit wird bei der Uhr durch das Pendel gewährleistet, das den stehenden Schwingungen im Pfeifenkörper entspricht, denn diese bleiben trotz des innerhalb kleiner Grenzen veränderten tonerregenden Luftstromes konstant. Die Ursache für den größeren Resonanzbereich der Pfeifen ist also die stehende Schwingung. Die Schwingungsbewegungen der beiden Luftlamellen, in die sich das Luftband an der Schneide teilt, werden von den Stößen der tönenden Luftsäule im Pfeifenkörper verstärkt (und umgekehrt), wenn man den Abstand der Oberlippe von der Kernspalte und die Geschwindigkeit des Luftstromes so wählt, daß der Ton des Pfeifenfußes dem durch die stehenden Schwingungen im Pfeifenkörper hervorgebrachten Tone entspricht. In diesem Falle gibt die Pfeife den besten Ton.

Eine wesentliche experimentelle Ausgestaltung hat die Zamminersche Theorie durch die Arbeiten von Wachsmuth und seinen Schülern erfahren. Die wichtigste dieser Publikationen ist die Untersuchung von Wachsmuth über Labialpfeifen und Lamellentöne.[3]) Es wird darin behandelt a) die Abhängigkeit der Schneidentöne vom Abstande zwischen Schneide und Kernspalte und vom Anblasedruck; b) die Wirkung des Pfeifenrohres als Resonanzröhre gegenüber den Schneidentönen; c) die Sichtbarmachung des anblasenden Luftbandes, der Luftlamelle, und seines Zerfalls in Teilschwingungen.

Im Folgenden möge zunächst eine Übersicht über die Resultate dieser Untersuchung gegeben werden.

### a) Schneidentöne.

Aus einem Stahlzylinder voll komprimierter Luft wurde unter Zwischenschaltung eines Reduzierventils ein konstanter Luftstrom durch einen meist 0,1 cm breiten und 4 cm langen Spalt eines Mundstückes gegen einen dem Spalt in veränderlichem Abstande genau gegenüber und parallel angebrachten schneidenförmigen Holzkeil getrieben. Sind Schneide und Spalt ganz dicht zusammen, so gibt es keinen Ton, man hört nur ein zischendes Geräusch. Wird der Abstand größer, so erhält man etwa zwischen 0,4 und 1,5 cm Entfernung einen klaren Ton, dessen Höhe bei noch größer

[3]) Labialpfeifen und Lamellentöne. Annalen der Physik (4. Folge). 1904. Bd. 14. S. 469 ff.

werdendem Abstand abnimmt. Wächst letzterer weiter, so kann sich der tiefe Ton bald nicht mehr halten, es tritt der bereits von M. Weerth[4]) nachgewiesene Oktavensprung in die Höhe auf. Bei noch größer werdender Entfernung zwischen Spalt und Schneide sinkt die Tonhöhe und springt dann um eine Quinte in die Höhe. Der Ton nach dem zweiten Sprung ist dem nach dem ersten Sprung fast gleich. Im Augenblick des zweiten Sprunges ist gleichzeitig ein tieferer Ton wahrzunehmen, der als eine Fortsetzung des ursprünglichen Grundtones anzusehen ist. Durch weitere Vergrößerung des Abstandes ist bei guten Versuchsbedingungen noch eine weitere Sprungbeobachtung möglich, der klare Ton hört jedoch bald nach dem zweiten Sprunge auf. Bei der Annäherung des Keiles lassen sich die Sprünge in umgekehrter Reihenfolge wieder beobachten, wenn auch die Sprünge nicht ganz genau an derselben Stelle auftreten.

Trägt man den Abstand zwischen Spalt und Schneide als Abszisse, die entsprechende Schwingungszahl als Ordinate in ein Koordinatensystem, so erhält man folgende, für die Schneidentonsprünge typische Kurve (Figur 1 auf folgender Seite).

Wiederholte Versuche, wobei Spaltöffnung, Gestalt des Windkastens und Keil verändert wurden, bestätigten das Sprunggesetz. Stets erfolgte, wenn die Schneide dem Spalt genau parallel gegenüberstand, der Oktavensprung, jedoch waren beim Quintensprung größere Abweichungen in der Tonhöhe zu beobachten. Eine kleine Sext, oder seltener die Quart trat an Stelle der Quinte. Der Ton zeigt zwischen den beiden Stellen, wo beim Entfernen und Nähern der Schneide in bezug auf den Spalt der gleiche Sprung beobachtet wurde, keine Stabilität. Wird der andere Ton erregt, so zwingt dieser der um die Schneide pendelnden Luftlamelle seine Periode auf, d. h. der Ton springt um.

Dieselben Sprünge und Sprungfolgen waren bei Konstanthalten des Schneidenabstandes und Veränderung des Druckes zu beobachten. Wachsmuth fand den Druck der Tonhöhe proportional, während Weerth gezeigt hatte, daß diese etwas langsamer als die Drucksteigerung zunimmt.

Liegt die Schneide des Keils nicht in der Mittelebene des Blasestromes, so springt der Ton um eine Oktave in die Tiefe.

---

[4]) Über Lamellentöne. Rostocker Philosophische Dissertation, 1902. Auszug daraus in den Annalen der Physik (4. Folge). 1903. Bd. 11. S. 1086 ff.

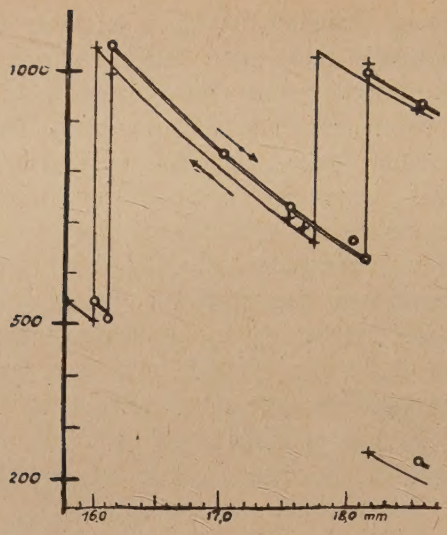



Fig. 1.

Diese Veränderung der seitlichen axialen Schneidenrichtung bedingt jenseits des Quintensprunges ebenfalls eine Tonhöhenveränderung um eine Oktave in die Tiefe, jedoch ist die Erscheinung hier nicht mehr regelmäßig.

### b) Wirkung von Resonanzröhren.

Hält man in die Nähe einer tönenden Schneide ein einseitig mit einem verschiebbaren Stempel verschlossenes Glasrohr senkrecht mit der offenen Seite gegen die Luftlamellenebene, so zeigt sich, daß benachbarte Schneidentöne in den Resonanzton zwangsweise übergehen, wenn man das Luftvolumen der Röhre durch Verschiebung des Stempels auf Resonanz abzustimmen unternimmt. Das vorhin nach Zamminer angeführte Pendelbeispiel für die stehende Schwingung in Resonanzröhren deckt sich mit der Erklärung Wachsmuths. Auch dieser fand für eine bestimmte Stellung des Stempels ein Tonmaximum, wenn der Schneidenton dem durch die stehenden Schwingungen im Resonanzkörper hervorgebrachten Tone entspricht. Wachsmuth wies ferner nach, daß man umgekehrt auch den Schneidenabstand oder den Druck bei Zuhilfenahme einer resonierenden Röhre innerhalb kleiner Grenzen ohne Einfluß auf die Tonhöhe verändern könne.

Man kann den ersten Oktavensprung ganz vermeiden, wenn der Schneidenabstand und das Resonanzvolumen gleichzeitig vergrößert

werden. Ist der Oktavensprung schon eingetreten, so bekommt man bei gleichbleibendem Schneidenabstand durch Verdoppelung der Resonanzrohrlänge wieder den um eine Oktave tieferen Grundton, der sich ohne Resonanz bei diesem Druck nicht halten kann.

Bringt man die Resonanzröhre in schräge Stellung gegen die Luftlamellenebene (Figur 2) und lehnt die Resonanzröhre an die Schneide an, so bleibt die Erscheinung dieselbe. Das Luftvolumen in der Röhre wirkt abwechselnd drückend und saugend, wie bei der Orgelpfeife.

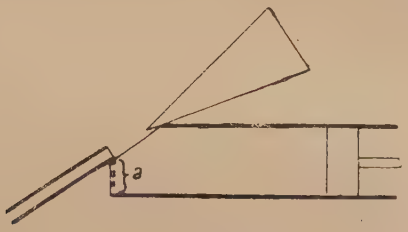



Fig. 2.

Das Stück a, der Abstand der Düse vom Röhrenrand (das dem Kern bei der Orgelpfeife entspricht), kann geschlossen oder offen sein, die Tonhöhe bleibt dieselbe.

Bei der Labialpfeife verschmilzt Schneiden- und Pfeifenton. Die Pfeife spricht am leichtesten bei einem bestimmten Schneidenabstand an. Der Ton wird aber auch von der stehenden Schwingung der Resonanzröhre dann gehalten, wenn der Schneidenabstand etwas variiert. Will man die Schneidentöne unterhalb der Resonanzgrenze hörbar machen, so muß der Luftdruck ganz gering sein. Wenn dieser wächst, setzt die Resonanz bei einer bestimmten Tonhöhe ein. Wachsmuth macht auf den Unterschied bei kleinen und großen Pfeifen aufmerksam.

Bei kleinen Pfeifen genügt ein geringer Anblasedruck, sie haben keine kräftige Resonanz. Wird mit sehr schwachem Druck die Pfeife angeblasen, so beobachtet man einen tiefen Schneidenton, der bei wachsendem Druck bis beinahe zur tieferen Oktave des Pfeifengrundtones steigt. Es erfolgt dann ein Sprung in die höhere Oktave, die Pfeife setzt mit Resonanz ein, die Oktave wird zunächst etwas zu tief, dann rein, darauf etwas zu hoch gehört. Die stehende Schwingung in der Pfeife hat dann bei weiterer Drucksteigerung nicht mehr die Kraft, den Ton zu halten, dieser springt wieder in die tiefere Oktave zurück (Figur 3). Von hier aus steigt er wieder langsam die Schneidentonskala hinauf, bis plötzlich mit

sehr kräftiger Resonanz die Pfeife abermals einsetzt, wenn der Schneidenton den Grundton der betreffenden Pfeife erreicht hat. In Figur 3 ist die für kleine Pfeifen typische Kurve festgelegt. Die Punkte, die den Schneidentönen entsprechen, sind darin durch Kreuze, diejenigen Punkte, welche in der Nähe des Resonanzgebietes liegen, durch Kreise bezeichnet.

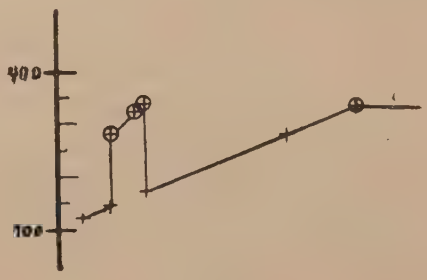



Fig. 3.

Für große Pfeifen (unterhalb der Schwingungszahl 200) ist die Resonanz so kräftig, daß man ihre Obertöne leicht anregen kann. Ein langsames kontinuierliches Steigen des Schneidentones, wie es bei den kleinen Pfeifen beobachtet wurde, ist nicht mehr möglich. Die Obertöne zwingen vielmehr dem Schneidenton, der eine Oktave oder Quinte höher oder tiefer ist als der Grundton, ihre Schwingungszahl auf. Kann sich die eine Schwingungsweise für den Schneidenton wegen Erhöhung des Druckes nicht mehr halten, so geht der ursprüngliche Schneidenton sofort in eine, seiner veränderten Tonhöhe besser entsprechende Oberschwingung über. Folgende Figur 4 zeigt die Reihe der Obertöne durch die eine gedackte Pfeife $g^0$ springt.

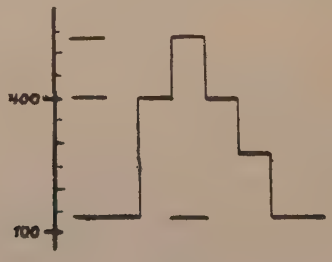



Fig. 4.

Melde[5]) hat dieselben Sprünge bei einer vierfüßigen offenen Orgelpfeife beobachtet.

Bei den mittleren Pfeifen sind mehrere Sprünge vor und zurück zu beobachten; zwischendurch treten kontinuierlich in der Höhe sich steigernde Tonfolgen auf.

Dieselben Versuche sind von Wachsmuth noch einmal mit erhöhter Sorgfalt wiederholt worden. So wurde der Schlitten aus Messing hergestellt, der Schneidenkeil festgemacht, der Blasekasten konnte mit einer feinen Führung durch eine Schraube von 0,8 mm Ganghöhe verstellt werden. Mit einem Wassermanometer wurde der Anblasedruck geprüft. Trägt man die Umdrehungen der Schraube als Abszissen auf ein Koordinatensystem und die Schwingungszahlen der Töne als Ordinaten auf, so ergibt sich für einen konstanten Druck (von 30 mm) folgende Kurve (Figur 5).

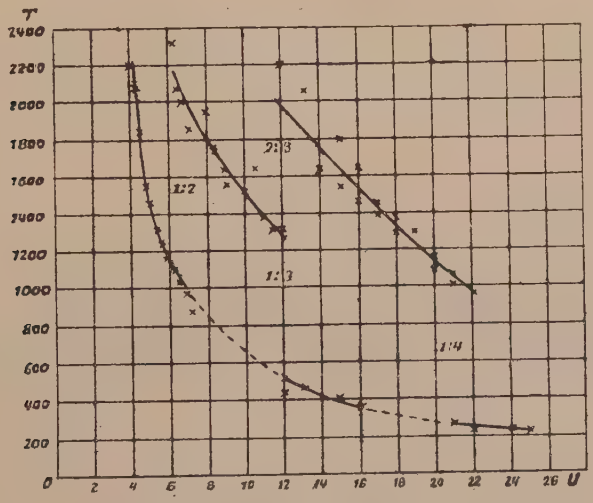



Fig. 5.

Die drei Kurvenstücke des Schneidengrundtons gehören einer gemeinsamen Linie an. Das ließ sich auch dadurch beweisen, daß es an vielen Punkten gelang, durch Anblasen und Verstellen der Stimmpfeife einen tiefen Ton zu finden, in welchen der Oktaven- oder Quintenton zeitweilig überging. Diese tiefen Töne liegen alle auf derselben Kurve.

---

[5]) Akustik. Internationale wissenschaftliche Bibliothek, Leipzig 1883, Bd. 56. § 78 und 79.

Wachsmuth hielt für den Vergleich mit der Labialpfeife einen konstanten Schneidenabstand, aber veränderlichen Druck mit Recht für wichtiger; auch ich habe in meinen im Folgenden noch zu beschreibenden Versuchen konstanten Schneidenabstand und wechselnden Druck gewählt. Die Tonhöhe fand Wachsmuth dabei proportional dem Druck. Die Werte der Schneiden- und Pfeifentöne einer offenen und einer gedackten Labialpfeife von 9 mm Maulweite, sowie der dazu gehörige Druck sind aus den beiden folgenden Kurvenbildern ersichtlich. Die Schneidentöne, die beim Anblasen der Schneide allein ohne den Pfeifenkörper entstehen, sind durch Kreuze, die Pfeifentöne durch kleine Kreise dargestellt.

In den Figuren 6 und 7 haben die Schneidentöne denselben Verlauf, nur der Resonanzbereich beider Pfeifen ist ein anderer.

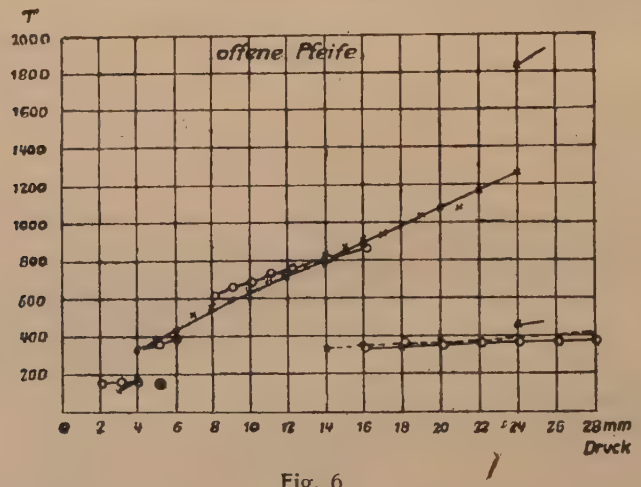



Fig. 6.

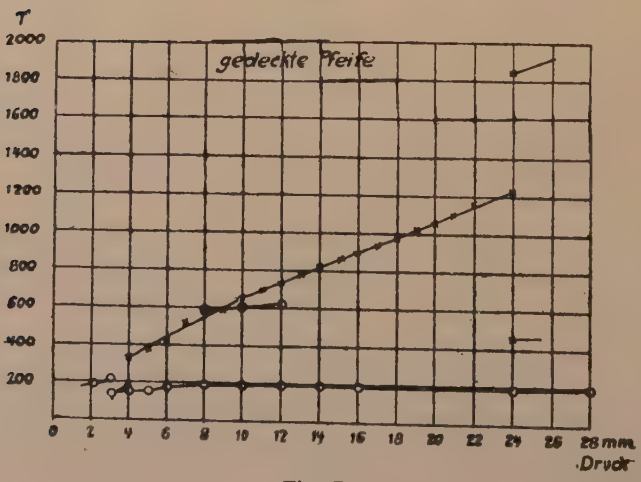



Fig. 7.

Die Pfeife folgt dem Schneidenton, wenn sich die stehende Schwingung im Pfeifenkörper nicht mehr halten kann. Die Sprünge blieben dieselben wie bei den ersten Wachsmuthschen Versuchen.

Wird ein höherer Druck (Überblasung) verwendet, so springt der Ton bei gedackten Pfeifen in die Duodezime, dann in den fünften, siebenten usw. Teilton — wobei der Grundton und die Duodezime häufig nebeneinander zu hören sind — bei den offenen Pfeifen in die Oktave, Duodezime, Doppeloktave, vierten, fünften, sechsten usw. Oberton über.

Sehr viele höhere Teiltöne werden auch hervorgerufen, wenn man einen Luftstrom über ein langes und weites Glasrohr wegbläst. Man hat es hier nach Wachsmuth ebenfalls mit Schneidentönen zu tun. Nur diejenigen Schneidentöne treten nach seiner Auffassung auf, deren Schwingungszahl der Periode der Schwingungsbewegung im Resonanzraum oder einem Vielfachen derselben gleich ist. Die beim Anblasen eines Hohlraums, z. B. eines Schlüssels, entstehenden Töne sind nach Wachsmuth ebenfalls Schneidentöne. Fehlt der Resonanzraum, so ändert sich die Tonhöhe mit dem Druck.

### c) Sichtbarmachung der Luftlamellen und ihres Zerfalls in Teilschwingungen.

Wachsmuth lag daran, den Vorgang der Luftlamellenschwingung objektiv sichtbar zu machen, um sich mit Hensen bezüglich der Erklärung der Schwingungsbewegung des Luftbandes auseinanderzusetzen. Dieser stützte sich zunächst auf Brockmann, mit dem er annahm, daß jeder Luftstrom die umgebende ruhende Luft in seine Bewegung hineinzieht; zu beiden Seiten einer Lamelle sollen so sekundäre Ströme auftreten, die schräg und zum Teil rechtwinklig zur Lamelle wirken. Geht der Luftstrom über einen Resonator hinweg, so kann sich der innere sekundäre Strom nur aus der im Resonator befindlichen Luft bilden, von der er so viel entnimmt, bis eine Luftverdünnung im Resonator entsteht und so der äußere sekundäre Luftstrom die Lamelle in den Resonator zwingt. Der hier entstehende Überdruck bewirkt, daß die Lamelle wieder nach außen gebogen wird, und so geht der Vorgang periodisch weiter. Da aber erstens der einmal zum Tönen gebrachte Resonanzkörper bei schwachem Drucke nicht mehr weitertönt und zweitens nach der Hensenschen Erklärung die Lamelle nur in ein sehr kurzes Stück der Resonanzröhre eindringen und diese so-

mit nicht die Kraft haben könnte, Transversalschwingungen des Luftbandes hervorzurufen, außerdem aber drittens die Erklärung der Übereinstimmung des auf diese Weise entstehenden Tones mit dem Eigenton des Resonanzkörpers fehlt, weist Wachsmuth, indem er an die Spalt- und Reibungstöne von Strouhal[6]) und W. Kohlrausch[7]) anknüpft, auf seine Schneidentontheorie hin. Auch Hensen hatte für die Schneidentöne eine Erklärung. Er ist der Ansicht, daß ein Luftband (Ortholamelle), welches auf eine Schneide trifft, eine periodische Stauung erfährt, die durch die nach beiden Seiten reflektierten Luftteilchen (T-Lamellen) bewirkt wird. Nach Hensen hat man also eine zweifach akustische Bewegung. Zunächst bewirkt die periodische Verdickung und Verdünnung der Lamelle Druckschwankungen, die sich als Schallwellen weiter fortpflanzen, ferner bewegen sich in der Ortholamelle Schwellungen solange in der Stromrichtung vorwärts, bis sie durch Reibung wieder verschwinden. Für die Labialpfeifen kommen aber nach Hensen — auch Wesendonck erklärte sich später gegen den Schneidentoncharakter der Pfeifentöne — die Schneidentöne nicht als wesentlich in Betracht. Vielmehr werden nach ihm im Sinne der noch zu erwähnenden Sonreckschen Theorie durch den Anblasestrom als solchen Verdichtungen und Verdünnungen im Pfeifenkörper veranlaßt, welche ihrerseits zu den stehenden Schwingungen Veranlassung geben.

Mit Hilfe von Tabakrauch, den auch schon Weerth angewendet, kam nun Wachsmuth zu einer anderen Erklärung des Vorgangs als Hensen. Während letzterer in den Druckschwankun-

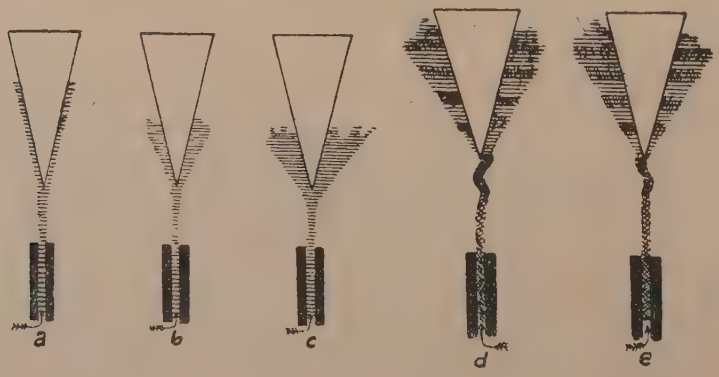



Fig. 8.

[6]) Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie. 1878. Bd. 5. S. 216 ff.
[7]) Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie, 1881. Bd. 13. S. 545.

gen, den longitudinalen Schwingungen innerhalb der Luftlamelle, die Ursache des Schneidentones sieht, weist Wachsmuth eine transversale Schwingung des immer neu entstehenden Luftbandes nach. Durch besondere Vorrichtungen war es möglich, die Bewegungsvorgänge in dem, dem Luftstrome beigemengten Tabakrauch mit Hülfe von Momentbildern sichtbar zu machen und die einzelnen Phasen der Tonbildung im Lichtbilde festzuhalten. Der aus der Spalte austretende Luftstrom blieb bei schwachem Druck zunächst gestreckt und lief geteilt am Keil parallel den Keilseiten entlang (Figur 8a, b und c).

Bei wachsendem Druck bildeten sich an diesen aufsteigende Wülste (Figur 9). Zu geicher Zeit trat auch der Ton auf. Bei intermittierender Beleuchtung sah man die Lamelle unterhalb der Schneide hin- und herpendeln, so daß die Luft bald an der einen Schneidenwand, bald an der anderen aufwärts wanderte und hier die eigentümlichen Wülste bildete. In der Nähe des Spaltes blieb das Luftband nach dem Austritt noch gestreckt, kurz vor der Schneide war dagegen auf Momentbildern ein Knick zu beobachten, den man bei intermittierender Beleuchtung als abwechselnd nach der einen oder der anderen Seite gerichtet erkannte. (Aus Figur 8d und e zu ersehen.) Die beiderseits der Schneide auftretende Wulstbildung kann, da die Drehung der Wirbel in der Bewegungsrichtung nach außen erfolgt, nicht auf Reibung am Keil, sondern nur auf Reibung an der Luft zurückzuführen sein. Aus der starken Ausbildung der ersten Wirbel wurde geschlossen, daß die Wülste zwischen Spalt und Schneide entstanden sein müßten. Die Anblaselamelle führt infolge ihrer Reibung an der umgebenden Luft von dieser einen Teil mit. Die Luftverdünnung, die dadurch auf der betreffenden Seite entsteht, bewirkt, daß das Band nach eben dieser Seite abgelenkt wird. Da der erste Teil des Luftbandes nächst dem Spalt gestreckt ist, kam für die Wirbelbildung nur der pendelnde Knickteil des Luftstromes in Frage. Bei Tabakrauch war der unterhalb der Lippe pendelnde Teil aber nicht deutlich genug sichtbar, und deshalb bediente sich Wachsmuth zur Aufnahme der einzelnen Tonbildungsstufen eines Kinematographen.

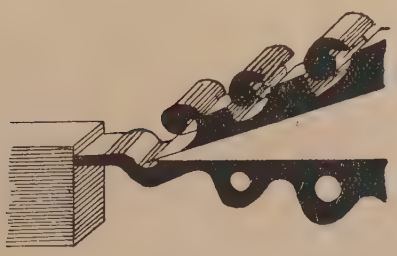


Fig. 9.

Hier eine Beschreibung der Einrichtung dieses Apparates zu geben, würde zu weit führen. Es kam darauf an, eine Reihe von Aufnahmen kurz nacheinander zu bekommen. Diese zeigten, daß das aus der Spalte austretende Luftblatt zunächst starr gehalten wird, unterhalb der Schneide dann aber in mehrere Bänder — je nach dem Luftdruck, dem Schneidenabstand oder der Spaltweite — zerfällt; und zwar entsprechen den Sprungstellen in der Tonhöhe Bruchstellen des Luftblattes.

Beim Abbrechen des ersten Bandes erklingt die Oktave,
beim Abbrechen des zweiten Bandes die Duodezime,
beim Abbrechen des dritten Bandes der dritte Oberton der Grundschwingung u. s. f.

Nebenstehendes Momentbild einer pendelnden Luftlamelle zeigt an der Spaltöffnung bis a das eigentliche Lamellenblatt, bei b, c und d die Bänder, in die das Lamellenblatt unterhalb der Schneide zerfällt. Entfernt man den Keil aus der Lamellenstromrichtung, so nimmt die Lamelle zunächst einen geraden Weg. Bringt man den Keil wieder in dieMitte der Lammellenblattebene, so wird das Gleichgewicht gestört, da sich eine absolute Symmetrie praktisch nicht ermöglichen läßt. Durch die entstehende Druckdifferenz der äußeren Kräfte wird eine Pendelung des Blattes hervorgerufen. Bei großem Keilabstand beginnt das Blatt mit der Pendelung schon weit vor der Schneide, bei näherem Abstand nahe der Schneide. Trifft der Luftstrom diese, so staut sich die Lamelle und biegt sich, es wird also zwischen Spalt und Schneide einen starken Bauch geben. Da nun die Luft einer Verschiebung ihrer Massenteilchen keine Gegenkraft entgegensetzt, sondern sich immer wieder durch andere Teilchen ersetzt, so werden die Bäuche mit der strömenden Luftlamelle vorwärts getrieben. Ist der Schneidenabstand nur kurz und die Schneide stumpf, so reichen die seitlichen Elongationen der

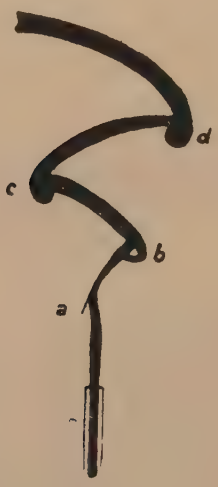


Fig. 10.

Pendelung nicht über die Dickenkanten hinaus und es entsteht kein Ton. Anders, wenn man den Schneidenabstand so weit vergrößert, daß die Kanten von der ganzen Dicke des Blattes überschritten werden. Alsbald schießt dann an der der Ausbuchtungsseite der Lamelle entsprechenden Keilseite ein Luftband entlang, ganz kurz darauf an der entgegengesetzten usw. Zugleich wird die Ausströmungsbewegung der Lamelle selbst periodisch, indem sie abwechselnd gehemmt und wieder befreit wird. In diesem Moment erhält man auch den ersten Ton.

Die bei beträchtlicherem Schneidenabstand und größeren Elongationen am weitesten seitlich hinausgedrängten Bänder stoßen sich beim weiteren Vorwärtstreiben, wenn die Pendelung des Blattes schon wieder zurückgeht, von den wieder zurückkehrenden folgenden Teilen ab. Die Luftverdünnung, die dem zurückkehrenden Blatte folgt, bedingt, daß dieses den Anfang des Bandes mit einem Wirbel abschließt. Wegen der Differenz der Bewegungsgeschwindigkeiten des Bandanfanges und Bandendes und der Stauung an der Schneide stellt sich weiterhin das Band quer. Bis dahin hat sich aber schon an der anderen Seite ein neues Band losgelöst, dessen dem Spalt zugewendetes Ende auch in einen Wirbel zusammengezogen ist, und so machen sich weiter abwechselnd auf der einen und der anderen Seite Bänder frei.

Folgende Figuren (11 u. 12) veranschaulichen die Bewegungen der Luftlamelle für einen kleineren und größeren Schneidenabstand.

Fig. 11.

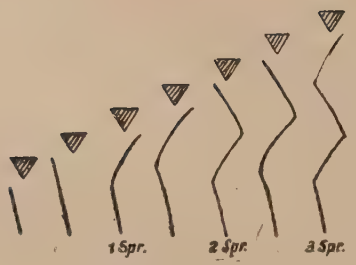



Fig. 12.

Die Bewegungsrichtung des Blattes ist durch Pfeile dargestellt. Ist das Blatt, das zunächst als Grundschwingung pendelt, nicht mehr genügend gestützt, d. h. wird es lang, so zerfällt es in die doppelte, dreifache, vierfache Schwingung. Bei den mit wachsendem Abstand auftretenden Sprüngen — deren Bildung in Fig. 12 schematisch gezeichnet ist — erklingt immer wieder ungefähr derselbe Ton.

Ob der Ton durch die periodische Erschütterung der Luft seitens des schwingenden Blattes oder durch rhythmische Erschütterung des Keiles entsteht, will W a c h s m u t h noch nicht entscheiden. Jedenfalls bilden sich nach seiner Darstellung die Schneidentöne, wenn eine frei ausströmende Luftlamelle in ihrem Gleichgewicht gestört wird, was durch die Asymmetrie der Schneide, an der sich das Luftband staut, hervorgerufen wird. Die Lamelle pendelt um die Schneide entweder als ganzes Blatt oder sie zerfällt in einzelne Bänder, welche die schwingende Bewegung gegen die Schneide vollführen. Der Resonanzraum bei der Pfeife hat den Zweck, ein Zerfallen der Luftlamelle in einzelne Bänder zu verhüten.

In einer Reihe guter kinematographischer Aufnahmen zeigt W a c h s m u t h die einzelnen Phasen der Tonbildung. Die photographische Aufnahmenreihe der Lamellenbewegung an der Schneide einer gedackten Orgelpfeife von 200 Schwingungen bei Unterdruck zeigte die durch Resonanz verstärkte Schneidentonschwingung. Das Pendeln des Blattes ist gut zu verfolgen, ebenso die gegen die Schneide ansteigenden losgelösten Bänder. Die kinematographisch aufgenommenen Luftbandphasen derselben Pfeife bei normalem Druck weisen keine Abstoßung von Bändern auf; das ganze Blatt pendelt um die Schneide, wir haben es also hier mit dem Grundton der Pfeife zu tun. Das Keilende der Lamelle wird durch die Resonanzwirkung baumartig auseinandergeblasen. Die Pendelung des ganzen Blattes wäre ohne Resonanzkörper beim gleichen Schneidenabstand und gleichen Druck nicht möglich, die Lamelle würde sich

in mehrere Bänder spalten. Je stärker der Druck wird, desto steifer wird die Lamelle, die Resonanz hält den Ton, der allmählich ein wenig höher wird, bis zum Sprunge in den folgenden Oberton der Grundschwingung. Der Druck ist dann so stark, daß die Oberschwingung jetzt die Grundschwingung der Lamelle bildet.

Die Lamellenbewegungen einer gedackten $c^0$-Pfeife von 129 Schwingungen bei Grundtonschwingung und Überblasung zeigen in beiden Fällen das durch die Resonanzwirkung bürstenartig auseinandergetriebene, um die Schneide pendelnde Luftband.

Bei dem hohen Tone (der Duodezime des Grundtones) ist die Lamelle wesentlich verkürzt. In beiden Fällen aber pendelt das ganze Blatt um die Schneide ohne Zerfall in Bänder, repräsentiert also die Grundschwingung der Luftlamelle, deren Frequenz nur bei dem höheren Druck entsprechend gesteigert ist.

Die Wachsmuthsche Arbeit zerfällt — wie aus dem Vorstehenden ersichtlich — eigentlich in zwei Hauptteile, nämlich 1. in die Untersuchung über das Wesen der Schneidentöne unabhängig von einem Pfeifenrohr und 2. in eine Untersuchung über die Bedeutung der Schneidentöne für die Tonbildung in Lippenpfeifen. Das Studium der reinen Schneidentöne ist weiter fortgeführt von König und Göller, ferner speziell für die Flöte von Steinhausen, an dessen Arbeit aber mehr seine Methode zur Untersuchung des Schwingungszustandes im Innern einer tönenden Luftsäule interessiert. Die spezielle Tonbildung in Lippenpfeifen ist dagegen von Karl L. Schaefer weiterbehandelt worden.

W. König[8]) gibt eine auf Versuchsergebnisse von Göller[9]) gestützte Erklärung der Schneidentöne. König will als Ursache der Tonbildung weder die Reibung der Luft an den Keilflächen, noch die Pendelungen der Lamelle angesprochen wissen, sondern schreibt die Tonentstehung periodischen Störungen in der strömenden Lamelle zu. Entsteht z. B. eine plötzliche Stauung an der Keilkante in der strömenden Lamelle, so pflanzt sich die Verdichtung mit Schallgeschwindigkeit nach allen Richtungen von der Kante aus fort und ruft, an der Luftstromaustrittsöffnung angekommen, dort in der Luftstromgeschwindigkeit eine Störung hervor. Diese wird nun vom Luftstrom mit dessen Geschwindigkeit mitgeführt und bewirkt an der Schneide eine zweite Störung. Bezeichnet man den Abstand zwischen Keilkante und Ausströmungsöffnung mit a, die

[8]) In den Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte (83. Versammlung zu Münster i. W. 1912. II. Teil. 1. Hälfte. S. 68).

[9]) Untersuchungen über Lamellentöne. Dissertation. Gießen 1912

Schallgeschwindigkeit mit c und die Strömungsgeschwindigkeit der Lamelle mit v, so ist $\frac{a}{c}$ die Zeit, die die Störung zur Zurücklegung der Strecke a von der Schneidenkante bis zur Ausströmungsöffnung gebraucht und $\frac{a}{v}$ die Zeit, die verstrichen ist, wenn die Störung denselben Weg a von der Ausströmungsöffnung bis zur Schneidenkante durchlaufen hat. Da der ersten Verdichtung eine Verdünnung in der Lamelle folgt, so ist erst die 3. Störung an der Keilkante wieder eine Verdichtung, die Zeit der ganzen Periode also $\frac{2\,a\,(c+v)}{c\,.\,v}$, die Schwingungszahl $n = \frac{c\,v}{2\,a\,(c+v)}$; c ist nun aber sehr groß gegen v, also kann man setzen: $n = \frac{v}{2\,a}$. Die daraufhin angestellten Versuche Göllers ergaben, daß 1. — in Bezug auf die Abhängigkeit der Tonhöhe vom Schneidenabstand — das Produkt a . n sehr nahe konstant ist, 2. n proportional v ist (v aus der Menge des ausgeflossenen Gases und dem Querschnitt des Spaltes berechnet) und 3. die Tonbildung erst auftritt bei einem Schneidenabstand von 3 mm, der mit $a_0$ bezeichnet wird. Vergrößert man den Abstand weiter, so sinkt der Ton und in der Nähe von 2 $a_0$ tritt der erste Sprung auf. Bei weiterem Wachsen des Schneidenabstandes verringert sich die Schwingungszahl des Tones, bis in der Nähe von 3 $a_0$ der zweite Sprung auftritt. Dann sinkt die Tonhöhe wieder. Der konstante Faktor in der Formel a . n = k . v hat für Abstände von $a_0$ bis 2 $a_0$ den Wert 0,4 und 0,5, für Abstände von 2 $a_0$ bis 3 $a_0$ springt der Wert auf 1, um dann für Abstände größer als 3 $a_0$ den Wert 1,5 anzunehmen.

König erweitert seine Theorie, indem er auf den Umstand hinweist, daß die an der Keilschneide entstehende Störung sich nach allen Richtungen mit der Schallgeschwindigkeit c, in der Lamelle aber mit der Geschwindigkeit c — v bewege. Die Differenz bewirkt nun beim Fortschreiten der Störung Druckdifferenzen zwischen dem Innern der Lamelle und ihrer Umgebung, und diese Druckdifferenzen könnten nach König die Ursache für die Tonbildung sein.

Im Jahre 1914 gab Wilhelm Steinhausen[10]) eine Methode zur Untersuchung des Schwingungszustandes im Innern einer tönen-

[10]) Zur Kenntnis der Luftschwingungen in Flöten. Dissertation, Gießen 1914.

den Luftsäule an. Die Methode stammt von R. König und beruht auf dem Abhören der Knoten und Bäuche mittels einer mit einem kleinen Seitenloch versehenen, in den Resonanzkörper eingeführten Röhre. Steinhausen verbesserte die Methode, indem er das Rohr — das König nur bis zu der Stelle, wo er den Schwingungszustand untersuchen wollte, einführte — durch den ganzen Resonanzraum führte und ferner ein künstliches Ohr, einen mechanischen Schallempfänger, benutzte, der relative Messungen der Schallstärke zuließ. Der durch das kleine Seitenloch in die Suchröhre eintretende Schall konnte, da ein Ende der Röhre verschlossen wurde, nur durch einen, den nicht verschlossenen Teil der Suchröhre fortsetzenden Gummischlauch zum mechanischen Schallempfänger, dem von Professor Garten konstruierten Membrananalysator, geleitet werden. Auf diesem war der Schwingungszustand an jeder Stelle des Resonanzraumes zu erkennen.

Karl L. Schaefer[11]) untersuchte die Tonbildung einer zinnernen offenen $g^3$-Pfeife in ihrer Abhängigkeit vom Anblasedruck. Letzterer wurde von Null an allmählich soweit gesteigert, bis die Überblasung der Pfeife in die Oktave ihres Grundtones einzutreten begann. Die Tonhöhen wurden durch Vergleichung mit Edelmann schen Laufgewichtgabeln bestimmt.

Die Pfeife setzte, nachdem Blasegeräusch vorausgegangen, mit ungefähr $d^1$ ein; worauf die Tonhöhe mit wachsendem Drucke anstieg, bis jenseits $e^2$ ein plötzlicher Sprung auf ein tiefes $fis^3$ stattfand. Das Wassermanometer zeigte hierbei einen Druck von 3 mm an. Bei weiter wachsender Stärke des Anblasens erhöhte sich der Ton bis zu einem etwas tiefen $gis^3$, um bei 6 mm Wassersäule sprunghaft auf ca. $h^2$ zurückzugehen. In der Folge trat dann wieder ein lückenloses Ansteigen ein: Man vernahm bei etwa 8 mm $c^3$, bei 9—10 mm $d^3$, bei 12—14 mm $e^3$, bei 16—20 mm $f^3$ und von hier an bis 80 mm eine langsame weitere Erhöhung bis über $fis^3$ hinaus. Dies ist der Grundton der Pfeife. Jenseits 80 begann die Oktave, der erste Oberton, sich deutlich bemerkbar zu machen.

Schaefer zeigt sodann, daß die Töne von $d^1$ bis $e^2$ erstens weder durch resonierende Verstärkung von seiten des Pfeifenrohres aus einem unbestimmten „Schneidengeräusch" herausgehoben werden, wie manche früher geglaubt haben, noch auf stehenden Wellen in der Pfeifenröhre beruhen, und daß sie zweitens auch von

[11]) Über Resonanz- und Maultöne der Lippenpfeifen. Diese Beiträge, Bd. 11. S. 197 ff. 1918.

Verlängerungen oder Verkürzungen des Pfeifenkörpers entweder gar nicht oder doch nur indirekt in ihrer Entstehung und in ihrer Tonhöhe beeinflußt werden.

Als in die Röhre der $g^3$-Pfeife ein nahezu luftdicht schließender Stempel soweit eingeführt wurde, daß seine Endplatte fast unmittelbar oberhalb des scharfen Randes der Oberlippe stand, also nur ein Lumen von ungefähr 4 mm von der ganzen Rohrlänge übrig blieb und die Pfeife gleichsam auf Kernspalte und Schneide reduziert war, ließ sich mit dem Pfeifenmaule auch die Tonreihe von $dis^2$ bis $g^3$ lückenlos hervorrufen.

Aus allen diesen Tatsachen dürfe man wohl schließen, sagt Schaefer, daß der Aufschnitt der $g^3$-Pfeife an sich eine vollständige Tonskala von $d^1$ bis $g^3$ zu liefern vermag. „Woher kommt dann aber," so fährt er fort, „beim regelrechten Anblasen mit zunehmendem Drucke die durch Töne der dreigestrichenen Oktave überbrückte Lücke zwischen $e^2$ und $h^2$? Offenbar ist die wesentliche Ursache hierfür der Umstand, daß die Oktaven der ausfallenden Maultöne eben in dem Resonanzgebiet der Pfeifenröhre liegen. Man wird sich den Vorgang wohl im Sinne Wachsmuths so vorstellen dürfen, daß die, dem gerade herrschenden Anblasedruck entsprechende Resonanztonhöhe mit überlegener Kraft ihre eigene Schwingungszahl auch der nicht genau unisonen Maultonoktave aufzwingt, und daß die alsdann gegen letztere verstimmte, unharmonisch gewordene Grundschwingung des Maultones sich infolge der Weichheit und Nachgiebigkeit der Luftzunge nicht mehr selbständig zu halten vermag."

Um die Lückenbildung innerhalb der Maultonreihe in ihrer Abhängigkeit von dem Eigentone der Pfeifenröhre weiter zu studieren, verwandelte Schaefer die $g^3$-Pfeife durch Verlängerung der Röhre erst in eine $dis^3$-Pfeife und dann in eine $c^3$-Pfeife. Mit der Vertiefung des Resonanzgrundtones der Pfeife wanderte auch die Lücke über die Maultonreihe entsprechend nach abwärts; zugleich ward sie dabei zunehmend schmaler. Wurde die Pfeife zu einer $a^2$-Pfeife gemacht, so trat ein eigentliches Überspringen in die Oktave nur noch sozusagen andeutungsweise an dem Punkte ein, wo die Maultonskala die Höhe $a^1$ erreichte. Bei der $g^2$-Pfeife blieb der Sprung gänzlich aus; es wurden lediglich die Töne $g^1$ und $gis^1$ von einer besonders lauten Oktave begleitet.

Hinsichtlich der Lage der Lücke in der Maultonreihe machte es bei der $g^3$-Pfeife selbst wie bei ihren Modifikationen einen Unterschied, ob mit wachsendem oder mit absinkendem Anblasedrucke

gearbeitet wurde. In letzterem Falle war das leere Intervall der Maultonskala regelmäßig etwas nach unten verschoben. Stets aber fand an dem Übergangspunkt vom Maulton zum Resonanzton oder umgekehrt gleichsam ein Kampf zweier rivalisierender Tonbildungen statt. Der Umschlag selbst kündigt sich in der Regel durch eine kurz vorhergehende Rauhigkeit des Klanges oder durch unregelmäßige Stöße an. Am deutlichsten sind letztere beim Übergang vom Maulton zum Resonanzton. Sie haben nicht die Präzision von Schwebungen, sind anfangs hauchend, zitternd, flatternd; werden dann frequenter und lauter und machen schließlich ziemlich plötzlich dem klaren starken Tone Platz. Daß sie aber in ihrer Tonhöhe mit letzterem schon übereinstimmen, das heißt also, daß der Ton zunächst stoßend, intermittierend auftritt und erst allmählich seine volle Kraft erhält, ließ sich wiederholt durch Vergleichung mit Hilfsgabeln einwandfrei feststellen. Direkt am Punkte des Umspringens und in seiner nächsten Nachbarschaft befinden sich die beiden fraglichen Töne sozusagen im labilen Gleichgewicht. Durch verschiedene kleine Kunstgriffe konnte Schaefer leicht den Resonanzton in den Maulton oder letzteren in ersteren umschlagen lassen.

Nach den Untersuchungen von Wachsmuth und von Schaefer ist nunmehr wohl jeder Zweifel ausgeschlossen, daß die Schneidentöne für die Tonbildung in Lippenpfeifen das Maßgebende sind und die Luftsäule im Pfeifenrohr nur durch ihre Resonanzwirkung auf einzelne der Schneidentöne oder deren Obertöne, also sozusagen als akzessorisches Moment, in Betracht kommt. Damit ist im Wesentlichen die Theorie der Tonbildung in Lippenpfeifen festgelegt. Sonach hat also die alte ursprüngliche Zamminersche Auffassung über das Wesen der Tonbildung in Lippenpfeifen schließlich den Sieg über die Sonnecksche Theorie davongetragen, die neben der anderen von einer Reihe von Physikern und Musikern vertreten worden ist und wohl auch heute noch vertreten wird. Fr. W. Sonneck[12]) hat zwischen mechanischer Erregung — d. h. der periodischen Abschneidung eines Teils der Luftlamelle an der Oberlippe — und der „akustischen Welle", die durch das Zusammentreffen der auf die obere Öffnung wirkenden, äußeren Luft mit dem durch die Druckausgleichung vom unteren Pfeifenkörper sich fortpflanzenden

[12]) Die Schwingungserregung und die Bewegung der Luftsäule in offenen und gedeckten Pfeifen. Poggendorffs Annalen der Physik. 1876, Bd. 158. S. 129.

Rückschlag in der Mitte des Pfeifenrohres sich bildet und die Schallwirkung hervorruft, unterschieden.

Das bei einer offenen Pfeife die Oberlippe streifende Luftband reißt mehr Luftteilchen von der im unteren Teile des Pfeifenrohres befindlichen Luft mit als im selben Augenblick in den Resonanzkörper hineinströmt. Sobald die dadurch im unteren Teile der Pfeife entstehende Luftverdünnung sich bis zur Mitte des Pfeifenrohres ausgedehnt hat, drückt die die Pfeife umgebende atmosphärische Luft die Luftlamelle an der Kernspalte in den Pfeifenkörper hinein. Dadurch wird die Verdünnung im unteren Pfeifenrohr ausgeglichen; es entsteht hier sogar eine kleine Verdichtung. Infolgedessen nimmt die Luftlamelle wieder die vorige Richtung ein. Zur Ausgleichung der Verdünnung ist also an der Oberlippe ein Teil des Luftstroms abgeschnitten worden. Beim weiteren Streifen des Anblasestromes an der Oberlippe entsteht wieder im unteren Teile des Pfeifenkörpers eine Verdünnung, es wird wieder ein Teil des Luftstromes abgeschnitten, und so wiederholt sich der Evakuier- und Ausgleichsvorgang periodisch. Die bei der Druckausgleichung im unteren Teile der Pfeife hervorgerufene kleine Verdichtung pflanzt sich längs des Rohres bis zur Mitte fort und bildet dort als Verdichtung mit dem Druck der äußeren Luft, der bis dahin auf die Luftsäule von der oberen Öffnung des Pfeifenkörpers her gewirkt hat, den Wellenberg, den Sonreck die „akustische Welle“ nennt. Dieser „akustischen Welle“ schreibt Sonreck auch die Schallwirkung zu. Er betont ferner, daß der von der Anblaselamelle abgeschnittene Teil mehr durch sein plötzliches Unterbrechen der Verdünnung, den dadurch hervorgerufenen Stoß auf die Luftsäule, als durch sein Volumen bei der Druckausgleichung wirkt.

Sonreck verwirft also die bis zu seiner Zeit vertretene Ansicht, daß die Schwingungsbewegung durch Stöße, die am Oberlabium entstehen, bewirkt sei. Er sieht die Ursache der Schwingungsbewegung in einem Hin- und Herpendeln der Luftlamelle um das Oberlabium und erklärt die Hin- und Herbewegung als eine Funktion der Luftsäulenelastizität im Pfeifenrohr und des die Pfeife umgebenden atmosphärischen Luftdrucks; die Pendelung der Luftlamelle um das Oberlabium folgt den Schwingungsgesetzen der Luftsäule. Die Verdünnungen und Verdichtungen der tönenden eingeschlossenen Luftsäule regeln also die Hin- und Herbewegung der Anblaselamelle.

Innerhalb des Pfeifenrohres schwingt die „akustische Welle“ —

die erste Verdichtung — nach beiden Pfeifenöffnungen zurück, wo sich jetzt je ein Wellenberg bildet, um ihre Schwingungsbewegung der die Pfeife umgebenden Luft mitzuteilen. Dies geschieht an der oberen Öffnung ohne Hindernisse, während von der unteren anderthalbmal kleineren Öffnung, der Aufschnittsöffnung, weniger stark klingende Schallwellen als von der oberen Öffnung ausgehen.

Um die im unteren Pfeifenkörper entstehende Verdünnung auszugleichen, durchzieht das Pfeifenrohr von der oberen Öffnung her stets von außen neu hinzutretende Luft. Nur in dem Augenblick, wo sich an der Kernspalte ein Teil von der Anblaselamelle abschneidet, der dann der Schwingungsbewegung im Pfeifenrohr einen neuen Impuls verleiht, wird das Hinzutreten der atmosphärischen Luft in die obere Öffnung unterbrochen. Die Schwingungsbewegung im Pfeifenkörper wird durch die im unteren Teile des Pfeifenrohres entstehende Verdünnung ebensowenig gestört, wie durch die von der oberen zur unteren Pfeifenöffnung strömende neu hinzutretende Luft.

Richtet man den Anblasestrom mehr in das Innere der Pfeife, so wird die Luftsäule auch zur Schwingung angeregt, und das geschieht ebenso bei allen Richtungen des Anblasestromes zwischen der äußersten Richtung nach innen und der äußersten Richtung nach außen. Die Luft im Pfeifenkörper erneuert sich aus dem Anblasestrom, indem nämlich ein Teil von diesem das Pfeifenrohr von der Kernspalte bis zur oberen Öffnung durchzieht. Bei Anblasestromrichtungen, die eine Erneuerung der Luftsäule durch die atmosphärische Luft von der oberen Pfeifenkörperöffnung her zur Folge haben, entstand im unteren Pfeifenrohrteil eine Verdünnung; jetzt entsteht da eine Verdichtung, die den Luftstrom an der Kernspalte nach außen drückt. Infolge der jetzt im unteren Pfeifenkörper entstehenden geringeren Dichtigkeit und des Druckes, den die die Pfeife umgebende Luft auf die Mundöffnung der Pfeife ausübt, gerät die Anblaselamelle wieder in ihre erste Richtung. Vom Anblasestrom werden also periodisch an der Oberlippe Luftwellen nach außen hin abgeschnitten. In diesem Augenblick pflanzt sich die erste Verdichtung aus der Mitte zugleich nach der oberen und unteren Öffnung hin fort, so daß die reflektierte Welle mit dem Anblasestrom zusammenfällt, der inzwischen wieder in das Innere des Pfeifenrohres gedrückt worden ist.

Bei den gedackten Pfeifen schneiden sich (meist) Luftwellen periodisch nach innen ab, füllen die durch den Anblasestrom im unteren Teil herbeigeführte Verdünnung aus, dort eine kleine Verdichtung hervorrufend, und so die erste Schwingung be-

wirkend. Die am oberen gedackten Ende reflektierte Verdichtungswelle dieser ersten Schwingung trifft mit der nach der abermaligen Verdünnung im unteren Pfeifenteil erneut abgeschnittenen Luftwelle zusammen.

Da die Schallwellen nur durch die Anblaseöffnung, also nur durch den Anblasestrom an die Außenluft mitgeteilt werden können, verlieren sie an Intensität.

Wenn aber auch im großen Ganzen nunmehr die Zamminer-Wachsmuthsche Auffassung als die richtigere erkannt ist, so fehlt es doch im Einzelnen noch an der genauen Durchprüfung der Tonverhältnisse der Lippenpfeifen von verschiedener Form und Tonlage. Wachsmuth hat, abgesehen von einem bestimmten Beispiel, nämlich dem Vergleich zwischen einer offenen Labialpfeife $fis^1$ und einer gedackten Labialpfeife $g^0$ von 9 mm Maulweite und einem angeblasenen Keil, der ebenfalls 9 mm Abstand von der Spaltöffnung hatte, eigentlich nur generelle Angaben gemacht und Schaefer hat lediglich eine einzige Pfeife, nämlich eine zinnerne offene $g^3$-Pfeife, behandelt — diese allerdings sehr gründlich —. Ich habe mir deshalb die Aufgabe gestellt, eine Reihe von Pfeifen aus den verschiedensten Tonlagen, offen und gedackt, in ähnlicher Weise zu untersuchen, wie es durch Schaefer geschehen ist. Die äußerliche Versuchsanordnung war in allen Fällen dieselbe. Die Pfeifen wurden mittels Preßluft aus einem großen Gasometer, in dem ein Überdruck von einer halben Atmosphäre herrschte, angeblasen. Die Luft trat durch einen Gummischlauch, in den ein Zimmermannscher Regulierhahn eingeschaltet war, in den Fuß der Pfeife. Kurz vor letzterem zweigte sich eine Schlauchleitung zu einem Wassermanometer ab, welches einen Druck bis zu 120 cm abzulesen gestattete. Der Regulierhahn ermöglichte es, den Druck von Null an in beliebig kleinen Stufen gleichmäßig zu steigern. Dies geschah in jedem Falle bis zum Eintritt der ersten Überblasung. Von jeder Pfeife wurde eine Kurve aufgenommen, deren Abszisse die Druckwerte und deren Ordinaten die zu jedem Druck gehörige Tonhöhe darstellen.

Zur Untersuchung kamen zinnerne und hölzerne, gedackte und offene Lippenpfeifen mit den Tönen A, $a^0$, $c^0$, $c^1$, $d^1$, $c^2$, $d^2$, $g^2$, $c^3$, $g^3$, $c^4$ und $g^4$. Die Beobachtungsergebnisse sind in den nachstehenden Protokollen niedergelegt.

# A. Zinnpfeifen.

## 1. Zinnerne $g^3$-Pfeife, offen.

Exemplar des Physiologischen Laboratoriums der Universitäts-Ohren- und Nasenklinik in der Charité zu Berlin.

**Hierzu Kurve Nr. 1.**

Die Maße der Pfeife in Millimetern sind folgende: Länge der Röhre 90; Durchmesser der Lichtung 14; Höhe des Aufschnittes 3,3; Länge der Kernspalte 9,5; Spaltbreite 0,5; Länge des konisch nach unten verjüngten Stiefels 155; Durchmesser des Stiefels an seinem oberen Ende 14, an der unteren Öffnung 3.

Diese schon von Karl L. Schaefer[18]) untersuchte Pfeife setzt bei ca. 1 mm Druck mit $d^1$ ein. Der Ton steigt mit wachsendem Druck kontinuierlich. Bei 2 mm ist ein Ton in der Mitte zwischen $a^1$ und $b^1$ zu hören. Ein hohes $h^1$ ist der Ton bei nahezu 3 mm. Wird der Druck auf etwas über diesen Stand des Manometers gesteigert, so wird hohes $cis^2$ gehört; bei 4 mm hohes $dis^2$, fast $e^2$. Hierauf erfolgt bei etwas über 4 mm ein Sprung auf ein tiefes $fis^3$. Dieser Ton steigt bei etwas über 6 mm Druck auf tiefes $gis^3$. Der Rücksprung auf hohes $h^2$ erfolgt bei nicht ganz 8 mm. Hat das Wassermanometer nahezu 10 mm erreicht, so wird $c^3$ gehört; bei 14 mm $dis^3$, bei 19 mm knapp $f^3$. Zu hohem $f^3$ wird der Ton bei 24 mm Druck. Bei 42 mm ist $fis^3$ zu hören. Wird der Druck weiter erhöht auf 60 mm, so steigt nur die Intensität des Tones. Bei 80 mm ist der Pfeifenton bei etwas über $fis^3$ angelangt. Die Überblasung in die Oktave ($fis^4$) wird bei einem Druck von etwas unterhalb 140 mm gehört. Die Oktave beginnt übrigens, sich schon jenseits 80 mm Druck deutlich bemerkbar zu machen.

Es wird zum Schlusse nochmals nachuntersucht, ob kurz vor dem Überblasen in die Oktave gleich wie bei einigen andern in dieser Abhandlung beschriebenen Pfeifen eine Knickung in dem Tonanstieg oder Stöße zu hören sind. Es ist nicht der Fall. Weder beim Aufsteigen des Druckes noch beim Absinkenlassen sind deutliche Stöße zu hören. Zuweilen scheinen solche flüchtig bei einem Druck von 130 mm aufzutauchen. Bei 140 mm beginnt der Überblasungston rein aufzutreten, bis dahin ist der Grundton dabei.

**Zusammenfassende Erklärung.**

Bei dieser Pfeife setzt die Schneidentonreihe mit $d^1$ ein und steigt im Ganzen kontinuierlich an, bis der Schneidenton den Reso-

[18]) a. a. O.

nanzgrundton des Pfeifenrohres erreicht. Nur an der Stelle, wo der Schneidenton die tiefere Oktave des Resonanzgrundtones bildet, findet der übliche Sprung aus dem einen Tongebiet in das andere statt. Daß man mittels gewisser Kunstgriffe die Schneidentonreihe auch durch diese Stelle in lückenloser Kontinuität hindurchführen kann, hat bereits Karl L. Schaefer am angeführten Orte gezeigt.

## 2. Zinnerne $c^3$-Pfeife, offen.

Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.

**Hierzu Kurve Nr. 2.**

Die Pfeife hat folgende Maße: Länge der Röhre: 140 mm; Durchmesser derselben: 16,5 mm; Länge der Kernspalte: 13 mm; Breite der Kernspalte: 0,5 mm; Höhe des Aufschnittes: 4,4 mm; die Länge des konisch nach unten verjüngten Pfeifenfußes beträgt 157 mm, der lichte Durchmesser desselben am unteren Ende 3 mm.

Wird bei der Pfeife der Druck äußerst langsam von Null an gesteigert, so hört man bei einem solchen von 2 mm $d^1$. Bei etwas über 2 mm steigt der Ton auf die Mitte zwischen $e^1$ und $f^1$. Ein tiefes $gis^1$ wird bei 3 mm gehört. Wenn das Wassermanometer 4 mm zeigt, ist der Pfeifenton in der Mitte zwischen $gis^1$ und $a^1$ angelangt, dabei springt die Pfeife von selbst in ein tiefes $h^2$ über. Bei etwas über 6 mm Druck ist $c^3$ mit $c^2$ zu hören. Diese beiden Töne bestehen gleich laut nebeneinander, so daß jeder derselben mit einer entsprechenden Gabel langsame Schwebungen macht. Das $c^3$ steigt noch eine Spur mit wachsendem Druck in die Höhe, springt dann zurück auf $dis^2$ bei 7 mm und geht bei einem Druck von 8 mm in ein tiefes $e^2$ über, welches bei 9 mm zu reinem $e^2$ wird. Schon bei einem Druck von 8 mm tritt aber Geräusch mit Stößen auf.

Bei einem Druck zwischen 9 und 10 mm hört man Mitte $e^2$—$f^2$ mit Geräusch, welches den Nebenton $h^3$ enthält; bei 10 mm wird Mitte $f^2$—$fis^2$ — ebenfalls mit Geräusch — vernommen. Reines $fis^2$ ertönt bei einem Druck von reichlich 10 mm, welches bei 11 mm zu einem hohen $fis^2$ wird. Unmittelbar darauf — bei etwas über 11 mm — erfolgt ein Rücksprung mit krächzendem Geräusch auf $e^2$.

Wenn man zur Kontrolle des Vorstehenden die Pfeife bei 11 mm Druck sich selbst überläßt, so daß Druck und Tonhöhe allmählich absinken, so hört man erst krächzendes Geräusch, dann unregelmäßiges Tremolo zwischen $e^2$ und $fis^2$. Schließlich bleibt $fis^2$ allein übrig, daneben hört man schön, laut und klar als hohen Nebenton $c^4$.

Bei 13 mm Druck ist der Ton auf Mitte $e^2$—$f^2$ angelangt. Tiefes $f^1$ wird bei 14 mm und 15 mm gehört. Krächzendes Geräusch stellt sich zwischen $fis^2$ und $g^2$ bei 16 mm Druck ein. Bei nahezu 17 mm hört man $g^2$ und bei 17 mm $b^2$; bei fast 22 mm $h^2$. Darauf vertieft sich der Ton wieder und daneben wird Geräusch vernommen. Bei einem Druck von 25 mm liegt der Ton wieder in der Mitte zwischen $b^2$ und $h^2$. Bei 32 mm Druck ist kein Geräusch mehr zu hören. Bei 34 mm ist der Ton gleich $h^2$, welches sich bei 40 mm noch soweit erhöht, daß es einen tiefen Differenzton mit der Edelmannschen Gabel $c^3$ gibt. Schwebungen mit dieser Gabel stellen sich als Zeichen weiterer Tonerhöhung bei einem Druck von 60 mm ein. Ebenso ist es bei 80 mm und bei 100 mm. Langsame Schwebungen mit der Gabel $c^3$ lassen sich auch bei einem Druck von 160 mm nachweisen. Wenn am Wassermanometer ein Druck von 190 mm erreicht ist, hört man die Überblasung in die Oktave.

**Zusammenfassende Erklärung.**

Die Schneidentonreihe der offenen $c^3$-Pfeife beginnt mit $d^1$ und steigt bis zur Mitte zwischen $gis^1$ und $a^1$, worauf die Pfeife von selbst in $h^2$ überspringt, weil in der Gegend von $a^1$ schon das Resonanzgrundtongebiet, das ungefähr eine Oktave höher beginnt, wirksam zu werden anfängt. Die Resonanz zwingt der Oktave des Schneidentones ihre eigene Schwingungsfrequenz auf, sodaß sie unharmonisch zum Schneidentongrundton wird und dieser sich nicht mehr daneben halten kann. Die Resonanztonhöhe steigt dann mit dem Druck und erreicht offenbar den Wert $c^3$ zu derselben Zeit, zu der der Schneidenton an sich zu der Höhe $c^2$ angestiegen wäre, so daß wegen dieser harmonischen Koinzidenz beide Töne nebeneinander bestehen können und also auch gehört werden. Der Rücksprung in die Schneidentonreihe auf den Ton $dis^2$ erfolgt, wenn mit zunehmendem Drucke der Schneidenton aus dem Resonanzgebiet herausrückt. Gleich darauf, nämlich bei etwa $e^2$ wird die Schneidentonregion zur unteren Duodezime des Resonanzoktavenbereiches $c^4$. Wieder zwingt, und zwar wie immer mit Geräusch, indem sich der Kampf zwischen den rivalisierenden Tonbildungen äußert, die Resonanz dem Schneidenton ihre Frequenz auf; das $e^2$ wird gewaltsam auf tiefes $f^2$ erhöht, neben dem die Duodezime $h^3$ als Resonanzoberton gehört wird. Die Resonanz-Unterduodezime $f^2$ steigt mit dem Druck auf $fis^2$, neben dem dessen Resonanz(ober)ton $c^4$ schön laut und klar hörbar ist. Mit weiterer Druckzunahme und Überschreiten des Resonanzbereiches erfolgt der Rücksprung in die Schneidenton-

reihe auf $e^2$, wieder eingeleitet durch tremolierendes geräuschvolles Kämpfen der Töne $fis^2$ (+) und $e^2$. In ähnlicher Weise, nur schwächer, macht sich auf den Schneidenton, wenn dieser die Region von $fis^2$—$g^2$ erreicht hat, die Einwirkung des gerade zwei Oktaven höher liegenden zweiten Resonanzobertones $g^4$, geltend. Im übrigen steigt der Schneidenton mit dem Drucke stetig höher bis auf $h^2$ bei ca. 22 mm Druck. Hierauf folgt nochmals unter Geräusch ein Rücksprung um den Betrag eines Vierteltones, der wohl als ein Kompromiß zwischen Schneiden- und Resonanzgrundton gedacht werden kann, wonach dann ein langsames kontinuierliches Steigen und schließlich die Überblasung erfolgt.

### 3. Zinnerne $c^4$-Pfeife, offen.

Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.

**Hierzu Kurve Nr. 3.**

Die Maße dieser Pfeife sind die folgenden: Länge des Pfeifenrohres: 65 mm; Durchmesser desselben: 11 mm; Länge der Kernspalte: 8 mm; Breite derselben: ca. 0,4 mm; Höhe des Aufschnittes: 2,5 mm. Die Länge des konisch nach unten sich verjüngenden Pfeifenfußes ist gleich 158 mm, der lichte Durchmesser desselben beträgt am unteren Ende 3 mm.

Die Tonbildung der Pfeife fängt zunächst mit Blasegeräusch an, dann wird bei 2 mm Druck $a^1$ gehört. Der Ton geht dann kontinuierlich bis etwas über $gis^2$ weiter. In diesem Augenblick erfolgt der Sprung bei genau 4 mm auf $b^3$. Bei 6 mm Druck wird die Pfeife unison mit einer Stimmgabel von 2000 Schwingungen, also einem tiefen $c^4$. Bei weiterer Drucksteigerung (8 mm) ist der Pfeifenton höher als 2000 Schwingungen. Er gibt mit der Gabel einen brummenden Differenzton (ist also ziemlich genau $c^4$). Gleich darauf (bei 10 mm) springt die Pfeife zurück auf hohes $dis^3$. Bei einem Druck von 12 mm hört man $g^3$, auch bei 13 mm ist der Ton noch $g^3$. Zeigt das Wassermanometer 14 mm, so ist er auf die Mitte zwischen $g^3$ und $gis^3$ gestiegen. Bei 15 mm ist hohes $gis^3$, bei 16 mm $a^3$ zu hören. Beim Wasserstande 20 mm springt die Pfeife — nachdem Geräusch mit Beitönen vorausgegangen — in $b^3$ über. Der Pfeifenton gibt mit der Gabel 2000, welche höher ist, einen brummenden Differenzton, bei einem Druck von 37 mm hat er 2000 Schwingungen erreicht. Zwischen 37 und ca. 190 mm steigt der Pfeifenton langsam noch so weit über 2000 Schwingungen, daß er mit der Gabel 2000 einen tiefen Differenzton gibt. Die Überblasung in $c^5$ erfolgt bei etwas über 180 mm.

Nachträglich wird nochmals die tiefste Tongebung bei schwächstem Druck unter Absinkenlassen des letzteren beobachtet: Der Ton geht herunter bis $gis^1$ und verschwindet dann im Blasegeräusch.

**Zusammenfassende Erklärung.**

Die Schneidentonreihe wird bei schwächster Druckgebung zuerst mit $gis^1$ resp. $a^1$ neben dem Blasegeräusch hörbar. Dieser Ton steigt dann kontinuierlich bis in die Gegend, wo er zur tieferen Oktave des Resonanzgebietes wird. Dann tritt das Überspringen der Tonhöhe in letzteres ein. Der Rücksprung in die Schneidentonskala erfolgt auf $dis^3$, auf welche Höhe der Schneidenton inzwischen, freilich wegen der Vorherrschaft der Resonanz an seiner hörbaren Entwickelung gehindert, angestiegen ist. Von diesem $dis^3$ aus geht dann die Zunahme der Tonhöhe gleichmäßig weiter, bis $a^3$ erreicht ist. Dann erfaßt die Resonanz den Schneidentongrundton, der ihr nunmehr selbst nahe genug gekommen ist und erhöht ihn unter dem üblichen Geräusch kämpfender Stöße auf $b^3$, das sich bei weiterer Druckzunahme auf $c^4$ erhöht. Daß auch der Schneidentongrundton mit einer sprunghaften Erhöhung in den Resonanzton übergeht bezw. mit ihm verschmilzt, ist beachtenswert, da es Licht auf den Umstand zu werfen geeignet ist, daß bei manchen Pfeifen der Grundton sich nachträglich vorübergehend wieder vertieft.

## 4. Zinnerne $g^4$-Pfeife, offen.

Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.

**Hierzu Kurve Nr. 4.**

Die Maße dieser Pfeife sind die folgenden: Länge des Pfeifenrohres: 42 mm; Durchmesser desselben: 9 mm; Länge der Kernspalte: 6 mm; Breite derselben: 0,4 mm; Höhe des Aufschnittes: 2 mm. Die Länge des konisch nach unten sich verjüngenden Pfeifenfußes beträgt 156 mm, der lichte Durchmesser desselben mißt am unteren Ende 2 mm.

Bei einem Druck von 2 mm wird ein tiefes $f^2$ gehört; bei etwas mehr als 2 mm $fis^2$. Der Ton steigt sodann kontinuierlich und ist bei 4 mm Druck ein tiefes $gis^2$, bei fast 6 mm ein hohes $a^2$. Nimmt der Druck auf über 6 mm zu, so ist das $c^3$ der entsprechenden Edelmannschen Gabel ohne Laufgewichte erreicht. Etwas weiter über 6 mm ist der Ton mit dem einer Gabel von 1100 Schwingungen unison, also ungefähr $cis^3$. Bei 7 mm tritt Unisono mit einer Gabel von 1200 Schwingungen, also mit einem tiefen $dis^3$, ein. Nimmt der

Druck weiter zu, so erhöht sich der Ton bis zu raschen Schwebungen mit zuletzt erwähnter Gabel, d. h. auf ungefähr $dis^3$. An diesem Punkt, bei fast 8 mm Wasserdruck, erfolgt ein Umsprung in die Oktave, nämlich auf $e^4$. Das $e^4$ wurde bestimmt durch Nachpfeifen mit dem Munde und Transposition in die zweigestrichene Oktave. Zeigt das Manometer fast 10 mm an, so ist $f^4$, welches ebenso wie $e^4$ bestimmt wird, zu hören. Bei genau 10 mm gibt der Pfeifenton mit der Gabel von 3200 Schwingungen, welche höher ist, den Differenzton $g^0$. Die Pfeife ist also ungefähr 200 Schwingungen tiefer als die Gabel, folglich ist der Pfeifenton in der Mitte zwischen $fis^4$ und $g^4$ angelangt. Bei etwas über 12 mm Druck ist der Ton so weit gestiegen, daß er nur noch rollende Schwebungen nebst tiefem Differenzton mit der Gabel von der Schwingungszahl 3200 gibt. Bei 14 mm Druck ist der Pfeifenton fast unison mit dem Ton der Gabel von 3200 Schwingungen geworden; daneben wird krächzendes Geräusch gehört. Hierauf erfolgt der Rücksprung in die Schneidentonskala auf die Mitte zwischen $g^3$ und $gis^3$. Wenn man ganz besonders vorsichtig mit der Drucksteigerung ist, kann der Ton sogar noch etwas tiefer sein als die Mitte zwischen $g^3$ und $gis^3$. Steigert man den Druck sehr sorgfältig über den Ton Mitte $g^3$—$gis^3$ hinaus, so erhöht er sich unter häßlichem Geräusch, bis ziemlich plötzlich und verhältnismäßig sehr rein $b^3$ bei 16 mm erscheint. Die nächsten Etappen sind dann die folgenden: bei 18 mm Mitte zwischen $b^3$ und $h^3$, bei 20 mm Mitte zwischen $c^4$ und $cis^4$, bei 25 mm $d^4$, bei 30 mm Mitte zwischen $d^4$ und $dis^4$. Zeigt das Wassermanometer 40 mm, so ist der Ton soviel tiefer als jener der Gabel mit 3200 Schwingungen, daß er mit ihr den Differenzton $fis^1$ gibt; der Ton ist also 365 Schwingungen tiefer als die Gabel, was der Mitte zwischen $f^4$ und $fis^4$ entspricht. Bei 50 mm Druck ist der Ton soviel tiefer als die Gabel 3200, daß beide zusammen als Differenzton ein hohes $d^1$ liefern, was ein tiefes $fis^4$ als Pfeifenton ergibt. Bei 60 mm Druck resultiert aus dem Vergleich zwischen Pfeifenton und Gabelton $fis^4$. Bei 80 mm zeigt sich ein hohes $fis^4$. Ist der Druck bei 100 mm angelangt, so gibt die Pfeife ein tiefes $g^4$. Dieses steigt sehr langsam weiter. Bei einem Druck von 200 mm liefert die Pfeife mit der Gabel 3200 einen brummenden Differenzton, bei 260 mm rollende Schwebungen, bei 300 mm langsame Schwebungen. Letztere werden bei einem Druck von 330 und 340 mm noch langsamer. Die Überblasung wird bei einem Druck von 350 mm erreicht.

**Zusammenfassende Erklärung.**

Das Tönen der Pfeife beginnt mit einem zunächst lückenlosen Anstieg der Schneidentonreihe. Wenn der Schneidentongrundton die Höhenlage $dis^3$ erreicht hat, kommt seine Oktave dem Resonanzgrundtongebiet des Pfeifenrohres so nahe, daß letzteres die Oberhand gewinnt: es erfolgt der Sprung auf $e^4$. Die Tonbildung durchläuft dann das Resonanzgebiet, bis nach Überschreitung des letzteren der Rücksprung in die Schneidentongrundtonreihe, nämlich auf $g^3$ (+) erfolgt. Fast unmittelbar darauf macht sich aber bereits der Einfluß des Resonanzoktavengebietes (ca. $e^5$—$g^5$) geltend, das zugleich die Duodezimen der nun folgenden Schneidentongrundtöne bildet: es erfolgt ein Sprung von ca. $gis^3$ auf $b^3$. Bei dem zuerst erwähnten Sprung von $dis^3$ auf $e^4$ wird die Oktave des Schneidentons in den Bann des gegen sie verstimmten Resonanzgrundtones gezwungen und der schwache Schneidentongrundton kann sich neben der zu ihm unharmonisch gewordenen Oktave nicht mehr halten, sodaß er völlig verschwindet. In letzterem Falle ist offenbar der Schneidentongrundton $gis^3$ gemäß dem stärkeren Druck schon zu kräftig, um ganz unterdrückt zu werden; er paßt sich also in seiner Höhe der überlegenen Oberschwingung an und springt selbst auf $b^3$. Von hier an geht dann die Schneidentongrundtonreihe weiter aufwärts, der Ton steigt von $b^3$ über $h^3$, $c^4$, $d^4$ usw. bis zur Koinzidenz mit dem Resonanzgrundton hinan.

## 5. Zinnerne $g^3$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $g^2$-Pfeife gemacht.

**Hierzu Kurve Nr. 5.**

Die Pfeife ist die unter 1) beschriebene, die für die hier in Frage kommenden Versuche mit einer Wachsplatte von genügender Dicke sorgfältig luftdicht an der Mündung verschlossen wurde.

Wird der Druck langsam von Null an gesteigert, so hört man, wenn das Wassermanometer 2 mm Druck zeigt, ein tiefes $g^2$. Bei minimaler Drucksteigerung erhöht sich der Ton ganz wenig über $g^2$, um dann sofort zurückzuspringen auf einen Ton, der eine Spur höher ist als $a^1$. Wird der Druck auf 3 mm gesteigert, so hört man hohes $h^1$. Bei 4 mm ist der Ton $dis^2$, bei 5 mm $f^2$, bei 6 mm $fis^2$, bei 10 mm tritt ein Ton auf, der in der Mitte zwischen $fis^2$ und $g^2$ liegt. Ein wenig höher ist der Ton bei 12 mm Druck. Tiefes $g^2$ ist er bei 15 mm. Zeigt das Wassermanometer 16 mm, so hört man $g^2$ mit langsamen Stößen. Bei 18 mm ist der Pfeifenton unison mit der

Edelmannschen Gabel $g^2$, er ist aber von Geräusch begleitet. Der gleiche Ton besteht bei 20 mm Druck; auch hier ist Geräusch dabei. Bei 24 mm wird $g^2$ + gehört. Hohes $g^2$ gibt die Pfeife bei 26 mm. Zeigt das Wassermanometer 30 mm, so wird ein Ton in der Mitte zwischen $g^2$ und $gis^2$ gehört. Bei 34 mm gibt die Pfeife tiefes $gis^2$ mit häßlichem Geräusch. Wird der Druck gesteigert, so vertieft sich unter Geräusch dieser Grundton; er ist wieder fast $g^2$. Bei 40 mm geht der Ton wieder höher hinauf; er wird fast $gis^2$, daneben ist Geräusch zu hören. Der Grundton wird bei 50 mm wieder lauter und tiefer; er ist etwas höher als $g^2$. Bei 60 mm erhöht er sich ungefähr auf die Mitte zwischen $g^2$ und $gis^2$, daneben zeigt sich ein hoher Oberton, der mit der Gabel 2400, welche höher ist, einen tiefen Differenzton gibt. Dieser hohe Oberton, zwischen $d^4$ und $dis^4$ gelegen, ist die Duodezime des Grundtons. Bei 76 mm verschwindet letzterer nahezu. Zeigt das Wassermanometer 90 mm, so ist der Grundton nur noch hauchartig zu hören; die Duodezime wird immer lauter. Mit zunehmendem Druck steigt sie, bei 110 mm ist das Unisono mit der Gabel 2400 erreicht. Bei weiterer Drucksteigerung über 110 mm hinaus, steigt die Duodezime weiter, so daß wieder Schwebungen mit der Gabel 2400 — die nunmehr tiefer ist — entstehen. Alsdann tritt an Stelle der Duodezime ein weit höherer Oberton. Nachträglich wird nochmals genau untersucht, ob die Pfeife gleich mit dem Resonanzgebiet einsetzt oder ob vorher noch eine Schneidentonreihe wahrzunehmen ist. Zu diesem Zweck wird die Tongebung der Pfeife bei schwächster Druckeinwirkung unter Absinkenlassen des Druckes geprüft. Der Ton geht von $g^2$ auf ein etwas hohes $fis^2$ herunter, das aber kaum noch im Blasegeräusch hörbar ist. Von einem Mitklingen einer tieferen Oktave ist nichts zu vernehmen. Offenbar setzt also hier die Pfeife mit dem Resonanzgebiet ein und ist ein Rücksprung aus dem Resonanzgebiet auf einen tiefer gelegenen Punkt der Schneidentonreihe beim Absinkenlassen des Druckes nicht zu konstatieren.

### Zusammenfassende Erklärung.

Der tiefste Schneidengrundton der Pfeife ist offenbar ein Ton aus der Gegend des $g^1$. Statt dessen wird der eine Oktave höher gelegene Resonanzgrundton gehört. Die Pfeife setzt also gerade im Sprunggebiet ein. Der Rücksprung erfolgt alsbald auf $a^1$ und dann steigt der Schneidentongrundton allmählich bis zur Koinzidenz von Schneidentongrundton und Resonanzgrundton. Die Tonhöhen-

schwankungen des Grundtones vor der Überblasung dürften wie bei der gedackten $c^3$-Pfeife eine Folge der Koppelung von Schneiden- und Resonanzgrundton sein.

## 6. Zinnerne $c^3$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $c^2$-Pfeife gemacht.

**Hierzu Kurve Nr. 6.**

Die Pfeife ist die unter 2) beschriebene, die für die hier in Frage kommenden Versuche mit einer Wachsplatte von genügender Dicke sorgfältig luftdicht an der Mündung verschlossen wurde.

Die Maße sind also dieselben, wie die unter 2) angegebenen.

Die Pfeife setzt bei ganz schwachem Druck mit hohem $f^0$, begleitet von einem schwächeren hohen $f^1$, ein. Diese Töne steigen bei noch nicht einem Millimeter Druck allmählich auf $fis^0$ bezw. schwächeres $fis^1$; dann erklingt bei ungefähr 1 mm Druck $g^0$ mit ungefähr gleichstarkem $g^1$. Zwischen 1 und 2 mm Druck hört man ein schwächeres $a^0$ nebst einem stärkeren $a^1$. Hierauf erfolgt bei 2 mm Druck ein Sprung auf $h^1$, welcher Ton verhältnismäßig laut einsetzt. Von hier aus steigt die Tonhöhe mit wachsendem Druck kontinuierlich auf $c^2$, um dann sofort auf hohes $cis^1$ in die tiefere Oktave zurückzufallen. Die Tonreihe steigt hierauf zunächst wieder ziemlich schnell. Bei reichlich 3 mm ist bereits ein tiefes $g^1$ erreicht. Bei 4 mm Druck hört man $a^1$, bei 5 mm $b^1$. Rollende Stöße werden bei etwas über 5 mm vernommen; der Ton ist aber immer noch $b^1$. Steigert man den Druck auf etwas über 5 mm, so hört man hohes $b^1$; bei einem Druck von 8 mm $h^1$. Krächzendes Geräusch tritt bei fast 10 mm Druck ein. Sind genau 10 mm erreicht, so wird ein etwas hohes $h^1$ gehört; der Ton wird wieder reiner. Bei einem Druck von 12 mm vernimmt man hohes $h^1$; bei einem solchen von 18 mm ist $c^2$ mit Geräusch zu hören, welches an Stärke bei 20 mm zunimmt. Auch bei einem Druck von 24 mm ist immer noch $c^2$ mit Geräusch zu hören. Erst bei 28 mm steigt der Ton auf etwas hohes $c^2$, welches sich bis zu einem Druck von 34 mm gleichbleibt. Sind 34 mm erreicht, so hört man wieder krächzendes Geräusch. Dieses bleibt neben dem etwas hohen $c^2$ bis zu einem Druck von 42 mm bestehen. Auch bei 44 mm ist noch dasselbe hohe $c^2$ vernehmbar, nur daß es von rauhen Stößen begleitet ist. Bei etwas mehr als 44 mm ist neben dem etwas hohen $c^2$ bereits die Duodezime zu hören. Zur Zeit, wo an dem Wassermanometer ein Druck von 47 mm abgelesen wird, ist der mit rauhen Stößen behaftete Ton auf tiefes $c^2$ gesunken. Bei 60 mm ist dieser immer

noch unveränderte Grundton, von Stößen begleitet, zu hören und daneben ein sehr lautes $g^3$. Das Überblasen in die Duodezime tritt bei einem Druck von 79 mm ein. Der Überblasungston gibt mit Gabel 1600 rasche Schwebungen, außerdem wird er durch Vergleichen mit einer Edelmann schen Gabel als etwas tiefes $g^3$ bestimmt, ist also die Duodezime des Grundtones $c^2$.

**Zusammenfassende Erklärung.**

Die Schneidentonreihe setzt mit $f^0$ und seiner schwächeren Oktave ein. Bei Steigerung des Druckes steigt der Schneidengrundton nebst seiner Oktave kontinuierlich an, die Oktave überwiegt aber an Stärke, und der Grundton tritt zurück, je mehr die Oktave sich dem um $c^2$ herum liegenden Resonanzgrundtongebiet nähert. Wenn die Schneidentonoktave die Lage $h^1$ erreicht, tritt die Resonanz in Wirksamkeit, und dieses $h^1$ springt laut und rein heraus. Die Resonanzwirkung reicht mit weiterer Drucksteigerung bis $c^2$, worauf der Rücksprung in die Schneidentongrundtonreihe, nach $cis^1+$, erfolgt. Der Schneidengrundton erhöht sich dann schnell, bis Schneidentongrundton und Resonanzgrundton zusammenfallen. Das im Verlaufe des letzten Endes der Reihe mehrfach beobachtete Auftreten von Geräusch erklärt sich wohl aus der Beeinflussung des Schneidentongrundtones durch den annähernd unisonen Resonanzgrundton, die auch die Ursache für das nochmalige Sinken der Grundtonhöhe kurz vor der Überblasung sein dürfte.

## 7. Zinnerne $c^4$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $c^3$-Pfeife gemacht.

**Hierzu Kurve Nr. 7.**

Die Pfeife ist die unter 3) beschriebene, die für die hier in Frage kommenden Versuche mit einer Wachsplatte von genügender Dicke sorgfältig luftdicht an der Mündung verschlossen wurde. Die Maße sind also dieselben, wie die unter 3) angegebenen.

Wird der Anblasedruck langsam von Null an gesteigert, so hört man, wenn das Wassermanometer 2 mm zeigt, einen Ton zwischen $h^2$ und $c^3$. Bei etwas mehr als 2 mm ist der Pfeifenton unison mit der Edelmann schen $c^3$-Gabel ohne Laufgewichte. Mit — allerdings minimal und kaum meßbar — zunehmendem Druck steigt der Ton um soviel, daß er etwa 20—30 Schwingungen mit dem $c^3$-Gabelton gibt. Sodann erfolgt plötzlich ein Sprung in die Tiefe: Der Ton ist ein tiefes $dis^2$. Bei fast 3 mm ist $e^2$, bei reichlich 3 mm $f^2$, bei 4 mm $fis^2$, bei etwas über 4 mm $g^2$, noch etwas über 4 mm

gis$^2$ zu hören. Wird der Druck bis nahe an 6 mm gesteigert, so gibt die Pfeife den Ton a$^2$. Bei genau 6 mm wird b$^2$ vernommen. Zwischen 10 und 12 mm sind die Pfeife und die Edelmannsche c$^3$-Gabel unison. Mit dem Steigen des Wassermanometers bis auf 20 mm erfährt auch der Ton eine weitere Steigerung: er erreicht ein tiefes cis$^3$. Bei 24 mm setzt häßliches Geräusch ein. Wird der Druck weiter gesteigert, so nähert sich der Pfeifenton dem Ton einer Gabel von der Schwingungszahl 1100, das Unisono mit diesem Gabelton wird bei 36 mm erreicht. Besonders häßliches Geräusch mit hohen Obertönen ist bei 40 mm Druck zu hören; der Pfeifenton ist nun etwas höher als der Ton der Gabel 1100. Auch bei 45 mm wird sehr häßliches Geräusch vernommen. Wenn das Wassermanometer einen Druck von 62 mm zeigt, so erklingt neben dem Grundton von ca. 1100 Schwingungen die Duodezime. Etwas oberhalb 110 mm ist der Grundton nur noch mit Mühe neben der lauten Duodezime zu hören.

### Zusammenfassende Erklärung und Beschreibung weiterer Versuche.

Die Pfeife verhält sich im wesentlichen ganz analog der gedackten g$^3$-Pfeife.

Bei verschiedenen weiteren Versuchen mit dieser Pfeife wurde eine interessante Beobachtung darüber gemacht, wie wesentlich die Art der Deckelung die Tonbildung beeinflußt. Bei etwas lose aufsitzender Verschlußkappe aus Wachs weicht die Tonbildung von der eben gemachten Beschreibung in folgender Weise ab. Die Pfeife setzt bei schwächstem Druck mit h$^1$ ein, der Ton steigt dann mit wachsendem Druck ganz kontinuierlich und durchläuft ohne jeden Sprung die ganze Schneidentonreihe bis zur Überblasung. Die Sprungstelle deutet sich lediglich dadurch an, daß in der Schneidentongegend um c$^2$ herum die Oktave des Schneidentones, die hier dem Resonanzgebiet entspricht, erheblich verstärkt wird. Ganz dasselbe Resultat ergibt sich, wenn man nicht den Druck vom Minimum aus langsam steigert, sondern die Pfeife zunächst etwa auf die Mitte der Schneidentonreihe einstellt und dann sich selbst überläßt, so daß Druck und Tonhöhe allmählich absinken. In einem Falle, wo die deckelnde Wachskappe besonders fest aufgesetzt war, zeigte sich, abgesehen davon, daß hierbei die Sprungregion sehr scharf markiert und die Resonanztöne sehr laut waren, folgende Eigentümlichkeit: als der Resonanzton in dem Sprunggebiet die Höhe c$^3$ soweit erreicht hatte, daß er gerade die

Oktave des Schneidentones bildete, wurde dieser — nämlich $c^2$ — laut neben $c^3$ gehört. Unmittelbar vorher und nachher war kein Schneidenton neben dem Resonanzton zu bemerken, offenbar, weil ihre Schwingungszahlen nicht in genügend genauer Übereinstimmung waren; die Geschwindigkeit der Höhenänderung ist ja beim Resonanzton eine andere wie beim Schneidenton[14]).

## 8. Zinnerne $g^4$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $g^3$-Pfeife gemacht.

**Hierzu Kurve Nr. 8.**

Die Pfeife ist die unter 4) beschriebene, die für die hier in Frage kommenden Versuche mit einer Wachsplatte von genügender Dicke sorgfältig luftdicht an der Mündung verschlossen wurde. Die Maße sind also dieselben, wie die unter 4) angegebenen.

Bei einem Druck von 3 mm wird ein Ton in der Mitte zwischen $fis^3$ und $g^3$ gehört; bei 4 mm ist der Ton genau $g^3$. Wird der Druck auf etwas über 4 mm gesteigert, so erhebt sich der Pfeifenton eine Spur über $gis^3$. Ein wenig oberhalb 4 mm erfolgt Geräusch und Umsprung nach der Tiefe auf einen Ton, der etwas über $a^2$ liegt. Dann steigt die Tonhöhe kontinuierlich. Zeigt das Wassermanometer 6 mm, so ist der Ton genau mit der Edelmannschen $c^3$-Gabel unison. Bei einem Druck von reichlich 7 mm hört man $d^3$, bei 8 mm $dis^3$, bei ca. 10 mm ein tiefes $f^3$, bei 12 mm genau die Mitte zwischen $f^3$ und $fis^3$, bei 14 mm genau $fis^3$, bei 30 mm tiefes $g^3$, bei 40 $g^3$, bei 64 die Mitte zwischen $g^3$ und $gis^3$, und bei 80 mm $gis^3$. Gleich darauf wird Geräusch gehört, welches an häßlicher Rauhigkeit bei einem Druck von 84 mm zunimmt. Der Pfeifenton kann als tiefes $gis^3$ angesprochen werden. Zeigt das Wassermanometer einen Druck von 100 mm, so wird immer noch unangenehmes Geräusch mit Schwirren gehört; der Pfeifenton selbst ist auf tiefes $g^3$ gesunken. Erst bei einem Druck von 112 mm wird der Ton reiner; er bleibt aber tiefes $g^3$. Auch wenn das Wassermanometer auf 160 mm steigt, hört man immer noch tiefes $g^3$; daneben macht sich ein hoher Oberton bemerkbar. Letzterer nimmt bei einem Druck von 180 mm an Intensität zu; der Grundton aber wird unrein, und ist, wenn das Manometer 190 mm erreicht, nur noch schwach zu hören. Bei einem Druck von 190 mm ist der Grundton nur noch angedeutet; der hohe Oberton dagegen sehr laut.

[14]) Vgl. die schon erwähnte Abhandlung von Karl L. Schaefer „Über Resonanz- und Maultöne der Lippenpfeifen", S. 214.

Letzterer bleibt auch bei weiterer Drucksteigerung bestehen. Bei 200 mm wird dieser Oberton durch Vergleich mit Hilfsgabeln als ein tiefes $d^5$, also die Duodezime des Grundtones, bestimmt.

Nachträglich wird der Beginn der Tonreihe bei schwächstem Druck nochmals in der Weise kontrolliert, daß die gedackte $g^4$-Pfeife mit 3 mm Druck angeblasen und dann sich selbst überlassen wird, wobei Druck und Tonhöhe allmählich absinken und letztere bequem zu verfolgen ist. Zunächst erklingt wieder $fis^3$; es wird bald schwach und stoßend, und bei ca. 2,5 mm erfolgt ein Tiefsprung auf hohes $dis^2$, neben dem $fis^3$ noch gelegentlich hörbar wird; der endgültig tiefste Ton, jenseits dessen sich nichts Tonales mehr konstatieren läßt, ist $d^2$, etwas hoch.

**Zusammenfassende Erklärung.**

Der tiefste Schneidenton dieser Pfeife ist bei sorgfältiger Regulierung der allerschwächsten Tongebung $d^2$. Gleich darauf folgt der Oktavensprung in das Resonanzgebiet, worauf die Schneidentonreihe nach dem Rücksprung bis zur Koinzidenz zwischen Schneidentongrundton und Resonanzgrundton steigt. Besonders deutlich zeigt sich bei dieser Pfeife, daß der Grundton sich zuletzt unter Geräusch und Schwirren wieder vertieft, was ja auch bei anderen Pfeifen beobachtet und wohl auf die Koppelung von Schneidenton- und Resonanzton zurückzuführen ist.

## B. Viereckige Holzpfeifen.

### 9. Gedackte hölzerne A-Pfeife.

Exemplar der Staatlichen Instrumentensammlung zu Charlottenburg.

**Hierzu Kurve Nr. 9.**

Die äußere Länge der Pfeifenröhre beträgt 780 mm; da aber der stempelförmige Deckel vom obersten Rand der Pfeife 16 mm ins Innere reicht, so mißt die lichte Länge des Pfeifenrohres nur 764 mm; die innere Breite, sowie die Länge der Kernspalte sind gleich 31 mm; Breite der Kernspalte: 1,6 mm; innere Tiefe der Pfeife: 43,5 mm; Höhe des Aufschnittes: 14 mm; Höhe der Oberlippe: 18,5 mm; die Länge des konisch nach unten verjüngten Pfeifenfußes beträgt 25 mm, der lichte Durchmesser desselben am unteren Ende 6 mm. Ein Vorversuch ergibt, daß sich diese gedackte hölzerne A-Pfeife im Gegensatz z. B. zu der im weiteren noch zu beschreibenden gedackten $c^0$-Holzpfeife mit d o p p e l t e r Schneide

und Kernspalte bequem überblasen läßt. Die Ursache liegt offenbar darin, daß die $c^0$-Pfeife wegen des doppelten Aufschnitts mehr Luft zum Anblasen benötigt als die gedackte hölzerne A-Pfeife, welche gleich allen gewöhnlichen Pfeifen nur einen Aufschnitt hat.

Wird nun bei der A-Pfeife der Druck äußerst langsam und ganz gleichmäßig von Null an gesteigert, so hört man zunächst nur ein Blasegeräusch. Bei einem Druck von 4 mm wird der Ton Gis gehört. Dieses verschwindet aber wieder, wenn das Wassermanometer 6 mm zeigt. Dafür vernimmt man dann ein tiefes $d^1$. Bei einem Druck von 8 mm ist nur Blasegeräusch zu hören, in welchem jedoch bei 10 mm sehr deutlich ein tiefes $dis^1$, sowie schwach $c^2$ auftaucht. Wird der Druck auf 11 mm gesteigert, so wird das $dis^1$ lauter, daneben tönt weiter $c^2$, welches aber erst bei 13 mm kräftiger hervordringt; dafür tritt aber dann der erstere Ton zurück. Starkes Blasegeräusch setzt bei einem Druck von 14 mm ein. Der Ton der eingestrichenen Oktave ist da überhaupt nicht mehr hörbar, wohl aber deutlich $c^2$, welches von einem schwachen, leisen, tiefen Ton begleitet ist. Erst wenn das Manometer 16 mm zeigt, wird dieser tiefe Ton lauter. Er wird bei diesem Druck als tiefes G festgestellt. Bei weiterer Drucksteigerung nimmt auch dieser tiefe Ton zunächst an Höhe zu. Bei 18 mm ist er nahezu G geworden, bei 22 hohes G, bei 30 mm tiefes Gis, bei 40 mm hohes Gis. Eine weitere Zunahme ist aber nur noch bis zu einem Druck von 80 mm zu konstatieren; diese ist ganz unbedeutend, denn bei 60 und 80 mm muß dieser Ton immer noch als hohes Gis angesprochen werden. Bei einem Druck von 100 mm ist derselbe Grundton, nämlich hohes Gis zu hören, daneben tönen schwach die Duodezime, sowie die große Terz der Doppeloktave, mit anderen Worten: man hört gleichzeitig den ersten, dritten und fünften Teilton. Wenn das Manometer einen Druck von 140 mm zeigt, beginnen rollende Stöße, welche bis zu einem Druck von 180 mm nicht verschwinden. Während dieser Stöße beginnt die Überblasung; der Grundton ist aber immer noch laut hörbar. Der Überblasungston ist die Duodezime des Grundtons. Erst bei einem Druck von 220 mm tritt diese rein heraus und ist der Grundton nicht mehr daneben zu vernehmen.

### Zusammenfassende Erklärung.

Die Schneidentonreihe setzt anscheinend mit ca. Contra-Gis ($Gis_1$) ein, was den Ton Gis hervorruft, der die Oktave von $Gis_1$ und zugleich Resonanzgrundton der Pfeife ist. Dieses Gis verschwindet wieder, wenn der Schneidenton zu hoch geworden.

Das tiefe $d^1$, vertiefter erster Resonanzoberton (vertiefte Duodezime des Pfeifengrundtones) der Pfeife dürfte von dem ca. eine Oktave tieferen Schneidenton D (—) hervorgerufen sein; Schneidenton und Resonanzton steigen dann, letzterer auf tiefes $dis^1$. In dieser Periode beginnt sich bereits der zweite Resonanzoberton der Pfeife $c^2$ (Terz der Doppeloktave des Pfeifengrundtones) eben bemerkbar zu machen, wie immer schon etwas eher, als der Schneidenton die entsprechende Höhe, hier ca. F, zu dem $c^2$ die Duodezime plus Oktave ist, erreicht hat. Der leise, tiefe Ton, der bei 14 mm, wo auch der erste Resonanzoberton verschwindet, neben $c^2$ ertönt, wird eben dieser Ton aus der Gegend von F sein, der dann nachweislich bei 16 mm auf tiefes G steigt. Damit ist das Resonanzgrundtongebiet erreicht.

Bezüglich der rollenden Stöße, die bei 140 mm Druck auftreten, wurde noch besonders geprüft, ob dieselben etwa mit einer Verstimmung des Grundtones in Zusammenhang ständen, wie an den analogen Stellen bei anderen Pfeifen. Es wurde daher der Pfeifenton bei einem Druck von 130 mm genau unison mit einer Edelmannschen Laufgewichtsgabel gestimmt und dann Pfeifen- und Gabelton bei steigendem Drucke verglichen. Beide blieben indessen auch in der Region der Stöße durchaus unison.

## 10. Dieselbe gedackte hölzerne A-Pfeife, durch Entfernen des Stempels zur offenen $a^0$-Pfeife gemacht.

**Hierzu Kurve Nr. 10.**

Die lichte Länge beträgt 780 mm; die übrigen Maße sind dieselben, wie sie unter 9) angegeben sind.

Wenn der Druck von Null an langsam gesteigert wird, so hört man bei 1 mm zunächst wieder Blasegeräusch, in welchem bei einem Druck von 2 mm äußerst schwach $g^0$ zu vernehmen ist. Auch bei 3 mm ist das Blasegeräusch noch vorhanden, es ist in ihm ein etwas hohes $g^0$ nebst Oktave zu hören, $g^0$ tönt aber stärker als $g^1$. Bei einem Druck von 4 mm erklingt ein in der Mitte zwischen $g^0$ und $gis^0$ gelegener Ton nebst Oktave, jedoch lauter als vorher. Bei 5 mm findet eine plötzliche Änderung statt: beide Töne verschwinden in rollendem Geräusch mit ganz tiefem, nicht bestimmbarem Beiton. Steigert man den Druck auf etwas unter 6 mm, so hört man im Blasegeräusch Stöße kämpfender Töne um $f^0$ herum. Bei 6 mm ist hohes $f^0$ bestimmbar, welches bei 7 mm zu einem hohen $fis^0$ wird. Steigert man den Druck auf etwas über 7 mm, so steigert sich der Ton auf Mitte $fis^0$ bis $g^0$. Bei 8 und 9 mm Druck

hört man reines $g^0$, welches aber von 8 auf 9 mm in der Tonstärke abnimmt. Dieses $g^0$ steigt bei einem Druck von 10 mm auf hohes $g^0$ und weiter bei 12 mm auf ein lautes und tiefes $gis^0$. Bei 13 mm hört man außerdem deutlich Gis, welches zweifellos dem Schneidenton an dieser Stelle entspricht. Wenn das Manometer 14 mm zeigt, so ist der Resonanzton etwas höher als bei 12 mm, aber immer noch lautes tiefes $gis^0$. Bei einem Druck von 15 mm hört man sehr deutlich $gis^0$ (—), bei 16 mm ebenfalls noch deutlich $gis^0$ (—), bei 17 bis 18 mm aber nur noch leises $gis^0$ (—). An dieser Stelle ist außerdem der Schneidenton B zu vernehmen, welcher sich bei einem Druck von 20 mm auf die Gegend von H erhöht. $gis^0$ (—) hört man da aber nur noch schwach und stoßend. Ob bei 22 mm Druck $gis^0$ oder g n e b e n dem Schneidenton — welcher nun zu Mitte H-$c^0$ angewachsen — noch vorhanden ist, muß bezweifelt werden. Bei ungefähr 24 mm ist kaum hörbar ein Ton zwischen $g^1$ und $fis^1$ zu vernehmen, daneben kann klar tiefes $c^0$, als tiefere Duodezime von $g^1$, festgestellt werden. Bei einem Druck von 25 bis 26 mm hört man Mitte $fis^1$ bis $g^1$ etwas deutlicher als bei 24 mm; hohes lautes $g^1$, das mit Gabel eingestimmt wurde, wird bei einem Druck von 30 mm vernommen. Bei 32 mm wird ein tiefes $f^0$ schwach neben dem noch etwas höher gewordenen $g^1$ gehört. Bei 34 erlischt dieses hohe $g^1$. Das erhöhte $f^0$ wird lauter und erreicht bei 36 mm die Höhe $fis^0$. Von nun an nimmt dieser Ton, offenbar der Grundton, an Intensität und Schwingungszahl zu. Bei 40 mm Druck ist er zu einem tiefen $g^0$ geworden. Bei 60 mm ist der Ton hohes $g^0$ und bleibt so bis zur Überblasung, die bei 218 mm eintritt, nachdem undeutlich rollende Stöße vorausgegangen. Bringt man die Pfeife zunächst auf einen Druck von 240 mm, wobei der erste Überblasungston rein gehört wird, und überläßt sie dann sich selbst, sodaß der Druck ziemlich rasch absinkt, so beginnt der Grundton neben seiner Oktave zunächst bei ca. 230 mit einzelnen langsamen Stößen aufzutreten, die zwischen 200 und 180 mm rollend werden, um dann jenseits 180 mm rein zu erklingen.

### Zusammenfassende Erklärung.

Der Schneidenton setzt bei 2 mm Druck mit etwa Contra-G ($G_1$) ein, das den Resonanzgrundton der Pfeife (ca. $g^0$; Doppeloktave des Schneidentones) weckt, der sich mit dem Schneidenton bis auf tiefes $gis^0$ erhöht und dabei stets noch von seiner Oktave begleitet ist. Dann tritt der Schneidenton aus dem Resonanzgebiet heraus, der Resonanzton verschwindet daher im Geräusch, in dem der

Schneidenton als ganz tiefer unbestimmbarer Ton zu hören ist. Das Auftreten von $f^0$ mit Stößen dürfte als Auftreten eines neuen Resonanzgebietes zu deuten sein, nämlich so, daß der Schneidenton auf ungefähr $B_1$ gestiegen ist, und seine Duodezime $f^0$, als stark vertieften Resonanzgrundton der Pfeife, herausdrückt. Mit wachsendem Druck steigen beide Töne. Wenn der Schneidenton eine gewisse Strecke über C hinausgekommen ist, nimmt der Resonanzton an Stärke ab; ehe er aber ganz verschwinden kann, beginnt er schon wieder als Resonanzoberton des Schneidentones G zu erscheinen. Es ist hierbei zu beachten, daß eben der Resonanzton stets noch eine Weile anhält, wenn auch der Schneidenton schon eigentlich zu hoch geworden ist, als daß beide noch im harmonischen Schwingungszahlenverhältnis stehen könnten, und daß er umgekehrt stets schon etwas eher auftaucht, als bis das rein harmonische Verhältnis zwischen ihm und dem Schneidenton erreicht ist. So verschwindet auch der Resonanzgrundton als Oktave des Schneidentones G erst, nachdem der Schneidenton auf über H gestiegen ist. Wenn der Schneidenton die Höhe $c^0$ erreicht hat, tritt zu diesem als seine Duodezime der erste Resonanzoberton der Pfeife von ca. $g^1$ hinzu. Auch dieser Resonanzton erlischt wieder, nachdem der Schneidenton, unter ihm hinweg ansteigend, die Höhe $f^0 +$ erreicht hat, und sodann steigt der Schneidenton unter schneller Intensitätszunahme bis zur Koinzidenz mit dem Resonanzgrundton an.

## 11. Gedackte hölzerne $c^0$-Pfeife.

Exemplar der Staatlichen Instrumentensammlung zu Charlottenburg.

**Hierzu Kurve Nr. 11.**

Die Pfeife hat wie alle gewöhnlichen Orgelpfeifen nur einen Aufschnitt. Die Länge der ganzen Röhre beträgt 573 mm. Der Deckel sitzt stempelartig im Innern der Pfeife und hat von der oberen Mündung einen Abstand von 23 mm; seine eigene, nach Beendigung des Versuches gemessene Dicke, beträgt 19,5 mm. Die schwingende Luftsäule hat somit eine Länge von 530,5 mm. Die lichte Breite der Pfeife sowie die Länge der Kernspalte ist gleich 42,5 mm. Die Breite der Kernspalte beträgt ca. 1 mm. Die lichte Tiefe der Pfeife mißt 53 mm. Höhe des Aufschnittes: 15,5 mm; Höhe der Oberlippe: 27 mm. Der konisch nach unten verjüngte Pfeifenfuß hat eine Länge von 26 mm; der innere Durchmesser desselben beträgt am unteren Ende 10 mm.

Wird der Druck sehr langsam von Null an gesteigert, so ver-

nimmt man bis zur Manometerablesung von 2 mm nur Blasegeräusch. Bei 3 mm ist ein tiefes $c^0$ zu hören, dessen Tonhöhe mit Hilfe einer Edelmannschen Gabel auf ca. 126 Schwingungen bestimmt wird. Der Pfeifenton steigt mit dem Druck bis zu fast $cis^0$ (ca. 135 Schwingungen) bei 4 mm. Bei 5 mm hat sich der Ton auf die Mitte zwischen $cis^0$ und $d^0$ erhöht. Dann verschwindet er bei etwas mehr als 5 mm; an dieser Stelle ist nur Blasegeräusch zu hören. In diesem wird bei 6 mm Druck ein hohes $fis^1$ undeutlich im Geräusch vernehmbar. Wird der Druck etwas über 6 mm gesteigert, so wird $fis^1$ deutlicher und erhöht sich zu einem Ton in der Mitte zwischen $g^1$ und $gis^1$. Bei 7 mm Druck ist laut tiefes $gis^1$ zu hören, der Pfeifenton steigt dann bei 8 mm Druck noch auf Mitte $gis^1$—$a^1$ und weiterhin fast noch auf $a^1$.

Wenn das Wassermanometer 9 mm Druck zeigt, so vernimmt man Blasegeräusch mit einem tiefen unbestimmbaren Ton, der in der Gegend um Gis zu liegen scheint. Bei einem Druck von 10 mm ist der Ton deutlicher, er schwebt mit der Edelmannschen Gabel Gis; genau bestimmt, liegt er zwischen Gis und A. Die Zunahme ist bis 17—18 mm Druck eine ziemlich rasche; bei etwas über 10 mm steigt der Ton auf A, bei 12 mm auf B und bei einem Druck von 17—18 mm erreicht er ein tiefes $c^0$. Fast reines $c^0$ wird bei 20 mm gehört, daneben tritt bereits die Duodezime auf, welche langsam mit der Edelmannschen Gabel $g^1$ schwebt. Bei einem Druck von 30 mm bestehen immer noch langsame Schwebungen des Pfeifentones mit der Edelmannschen Gabel $c^0$; daneben wird laut die Duodezime vernommen. Zeigt das Wassermanometer 40 mm, so sind die Schwebungen mit der Edelmannschen Gabel $c^0$ rascher; der Pfeifenton ist fast $cis^0$ geworden. Bei 60 mm Druck hört man sehr langsame Schwebungen mit $cis^0$. Der Ton steigt bei 90 mm noch auf ein Weniges über $cis^0$. Zwischen 90 und 100 mm treten rollende Stöße auf. Diese vernimmt man bei einem Druck von 110 mm besonders gut. Beim Vergleichen des Tones mit der Stimmgabel hört man diese Stöße anscheinend noch klarer, dabei ist aber der Pfeifenton unison mit der Stimmgabel, und zwar mit derselben Höhe, welche letztere beim Vergleichen unter dem Druck von 90 mm hatte. Sobald der Gabelton ein wenig vertieft oder erhöht wird, kommen ganz langsame Schwebungen zwischen Pfeifenton und Gabel zum Vorschein, die neben den unveränderten rollenden Stößen hörbar sind. Hieraus folgt, daß der Pfeifenton noch der gleiche ist, wie beim Druck von 90 mm. Bei einem Druck von 120 mm sind ebenfalls langsame Stöße zu hören. Es überwiegt an Intensität die

Duodezime den Grundton. Was die Tonhöhe des letzteren betrifft, so ist sie bei 120 mm noch genau dieselbe wie bei 90 mm. Wenn das Wassermanometer 240 mm erreicht, wird die Überblasung (Duodezime) rein gehört.

**Zusammenfassende Erklärung.**

Der Schneidenton setzt offenbar, im Blasegeräusch unhörbar, etwas unterhalb C ein, sodaß die Resonanz den Oberton $c^0$ erfaßt und herausdrückt. Dieser Resonanzton steigt bis über $cis^0$ und erlischt im Blasegeräusch, weil inzwischen der unhörbare Schneidenton zu hoch geworden, als daß der Resonanzton sich noch halten könnte. Bei Annäherung des Schneidentones an F erscheint als erster Resonanzoberton dessen Doppeloktave $fis^1$ und dieser Ton wächst in seiner Höhe allmählich auf nahezu $a^1$. Inzwischen ist der Schneidenton soweit erhöht und kräftig geworden, daß er bei 9 bis 10 mm Druck anfängt, seine Grundschwingungen selbst geltend zu machen, während der Oberton des um $g^1$ gelegenen Resonanzgebietes mit ca. $a^1$ erlischt, weil damit das Ende des Resonanzgebietes erreicht ist. Ist der Schneidenton zu $c^0$ geworden, also ungefähr gleich dem Resonanzton der Pfeife, so tritt wieder der erste Resonanzoberton, die Duodezime $g^1$, hinzu.

## 12. Dieselbe gedackte hölzerne $c^0$-Pfeife, zur offenen $c^1$-Pfeife gemacht.[15])

**Hierzu Kurve Nr. 12.**

Die Länge der ganzen Röhre ist 573 mm. Die übrigen Maße sind dieselben, wie unter 11) angegeben.

Wird der Druck von Null an langsam gesteigert, so hört man zunächst nur Blasegeräusch, in welchem sich bei 2 mm Wasserdruck angedeutet tiefes $h^0$ findet. Der Ton wird bei 3 mm reines $h^0$, bei 4 mm hohes $h^0$ und steigt bei fast 5 mm Druck noch auf tiefes $c^1$. Ehe das Wassermanometer 5 mm zeigt, springt der Ton unter Geräusch von tiefem $c^1$ auf $g^0$ zurück, mit dem aber äußerst schwach dieses tiefe $c^1$ noch mittönt. Bei 6 mm Druck ist das $g^0$ auf $gis^0$ ge-

[15]) Da der obere Rand des Stempels bei der gedackten $c^0$-Pfeife (unter 11 beschrieben) 23 mm von der oberen Mündung der Pfeife abstand und die Stempeldicke selbst auch noch 19,5 mm betrug, so wird, da durch das Öffnen der Pfeife der Resonanzkörper sich um 42,5 mm verlängert, der Grundton der nun o f f e n e n Pfeife nicht in der gleichen Weise verändert wie beim Öffnen einer, durch einen von außen aufgeleimten oder aufgeschraubten Deckel verschlossenen Pfeifenröhre.

stiegen. Reines $h^0$ wird bei 8 mm Druck laut gehört (andere Töne werden daneben nicht vernommen). Der Ton steigt bei weiterer Drucksteigerung (10 mm) dann noch auf tiefes $c^1$, bei welchem er, selbst bei einem Druck von 11 und 12 mm, verharrt. Auch bei 13 mm ist dieser Ton anscheinend noch vorhanden. Von 11 mm an läßt er sich aber nicht mehr mit der schwebenden Hilfsgabel genau unison stimmen; er ist dazu zu schwach und das Blasegeräusch zu stark, so daß eine genaue Kontrolle nicht mehr möglich ist.

Bei einem Druck von ca. 13 mm taucht $c^0$ im Blasegeräusch äußerst schwach, doch feststellbar auf. Es ist dies der Ton, der dann mit zunehmendem Druck kontinuierlich bis $f^0$ bei 20 mm Druck steigt. Zwischen 13 und 20 mm ist das Blasegeräusch besonders stark. In diesem ist bei 20 mm ziemlich undeutlich $f^0$ zu vernehmen. Wird der Druck weiter gesteigert, so hört man bei 28 mm $g^0$, bei 40 mm $b^0$. Bei 60 mm ist der Pfeifenton fast $h^0$ geworden; $h^0$ wird bei 90 mm völlig erreicht. Bei 100 mm Druck ist der Ton $h^0$ (+), bei 120 mm noch um einige Schwingungen höher. Als das Manometer 150 mm zeigt, ist der Pfeifenton ein sehr tiefes $c^1$ geworden.

Der Druck wird gesteigert bis auf 400 mm, einen höheren liefert bei dieser Pfeife die Maschine nicht. Bei diesem Druck von 400 mm ist die Überblasung noch nicht erreicht. Man hört die Oktave nur eben angedeutet. Es ist möglich, daß die Tonhöhe des Grundtones bei weiterer Drucksteigerung noch um ein weniges gestiegen wäre. Die bei den andern Pfeifen aufgetretenen rollenden Stöße sind in diesem Falle nicht gehört worden, vermutlich weil der dazu nötige Druck nicht erreicht wurde.

Nach Abschluß dieser Versuchsreihe wird zur Kontrolle nochmals geprüft, ob bei Absinkenlassen des Druckes von 20 mm an, der bei diesem Druck hörbare Ton $f^0$ sich weiter nach unten vertieft. Dies ist in der Tat der Fall. Der Ton sinkt kontinuierlich bis $c^0$ bei 14 mm Druck. Die Reihe dieser Töne ist äußerst schwach im Blasegeräusch zu hören. Sie lassen sich aber mit schwebenden Hilfsgabeln nachweisen. Es werden eine Reihe Vexierversuche angestellt. Ein Helfer stellt einen beliebigen Druck zwischen 14 und 20 mm ein und der Beobachter muß jedesmal die zugehörige Tonhöhe feststellen, ohne die Druckgröße zu kennen. Für jeden bestimmten Druckwert wird dann auch jedesmal die gleiche zugehörige Tonhöhe mit genügender Genauigkeit angegeben.

### Zusammenfassende Erklärung.

Die Schneidentonreihe wird offenbar mit Tönen aus der Gegend des $H_1$ eröffnet, als dessen Doppeloktave das Resonanzgrundton-

gebiet hörbar wird. Dann tritt unter dem üblichen Geräusch ein Umschlag ein und das Resonanzgrundtongebiet macht sich nun als Duodezime des Schneidentones geltend. Bei 8 mm dürfte der Schneidenton etwa den Höhenwert von E erreicht haben, als dessen Duodezime $h^0$ erklingt. Bei spätestens 13 mm erlischt die Resonanzwirkung, und im Geräusch beginnt mit $c^0$ die Schneidentonreihe selbst hörbar zu werden, die dann bis zur Höhe des Pfeifengrundtones ansteigt.

## 13. Gedackte hölzerne $c^0$-Pfeife mit doppeltem Aufschnitt.

Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.

**Hierzu Kurve Nr. 13.**

An der Pfeife, die ursprünglich in erster Linie otiatrischen Zwecken dienen sollte, ist, offenbar um die Klangstärke zu erhöhen, an der Rückwand noch ein zweiter Aufschnitt angebracht. Beide Aufschnitte haben natürlich in allen Stücken gleiche Maße. Die ganze Länge der Röhre ist gleich 700 mm. Nach Abschrauben des Deckels zeigt sich, daß im Innern noch ein zweiter Deckel — welcher, weil eingeleimt, nicht entfernt werden kann — vorhanden ist. Dieser hat von der oberen Mündung der Pfeife einen Abstand von 40 mm. Die lichte Breite der Pfeife beträgt gleich der Länge der beiden Kernspalten 45 mm, die Tiefe der Pfeife 50 mm; Höhe der Aufschnitte: je 18 mm; Höhe der Oberlippen: je 55 mm; Breite der Kernspalten: je 0,8 mm. Die Länge des konisch nach unten verjüngten Pfeifenfußes ist gleich 49 mm; der lichte Durchmesser desselben beträgt am unteren Ende 9 mm.

Neben Blasegeräusch ist bei einem Druck von 1 mm ganz schwach und stoßend $g^1$ zu hören. Bei etwas über 2 mm beginnt plötzlich der Grundton $c^0$. Dieser wird, wenn das Wassermanometer einen Druck von 3 mm zeigt, etwas stärker, dann sogleich wieder schwächer. Bei 4 mm Druck schwebt der Pfeifenton mit einer $c^0$-Gabel. Die Schwebungen mit eben dieser $c^0$-Gabel sind bei 6 mm Druck ganz langsame; daneben ist ziemlich laut die Duodezime $g^1$ zu hören. Langsame Schwebungen mit Gabel $c^0$ sind auch bei einem Druck von 8 mm zu vernehmen, ebenso bei 10 mm. Der Grundton verschwindet bei 12 mm; die Duodezime ist sehr schwach zu hören, sie wird aber mit zunehmendem Druck lauter. Nachdem das Wassermanometer einen Druck von 22 mm zeigt, setzt ein tiefes Gis von ca. 101 Schwingungen ein. Bis zu einem Druck von 50 mm erfolgt nun ein kontinuierliches Steigen: bei 24 mm ist der Ton auf hohes Gis, bei 26 mm auf A (ca. 109 Schwingungen), bei 30 mm auf B

(ca. 116 Schwingungen), bei 36 mm auf etwas hohes H, bei 40 mm auf einen Ton in der Mitte zwischen H und $c^0$ und bei einem Druck von 50 mm auf $c^0$ gewachsen. Von da ab bleibt der Grundton bis zu einem Druck von 80 mm unverändert. Auch bei einem solchen von 100 und 120 mm ist er noch $c^0$; der Grundton der Pfeife ist mit der Edelmannschen Gabel von genau 128 Schwingungen unison. Bei einem Druck von ca. 150 mm ist neben dem Grundton auch dessen Duodezime schwach zu vernehmen. Sehr deutlich ist diese neben dem übrigens viel kräftigeren Grundton bei einem Druck von 180 mm zu hören. Eine Überblasung konnte indessen selbst bei einem Überdruck von einer halben Atmosphäre im Windkessel und völlig offener Schlauchleitung zur Pfeife nicht erzielt werden. Der Druck läßt sich über 180 mm kaum steigern, weil die Pfeife zuviel Luft verbraucht.

**Zusammenfassende Erklärung.**

Die Schneidentonreihe setzt mit etwa C ein, das von seiner Oktave $c^0$ als dem Resonanzgrundton der Pfeife und dessen Duodezime $g^1$ — diese ist im ersten Anfang sogar allein hörbar — begleitet wird. Der Resonanzgrundton nebst Duodezime beharrt noch, während der Schneidenton steigt. Dann kann das Resonanz-$c^0$ sich nicht mehr halten, aber die Duodezime bleibt und verstärkt sich als Resonanzgebiet, nunmehr nämlich als Doppel-Oktave des Schneidentones um G herum. Sobald Schneidenton und Resonanzton ungefähr ihre harmonische Koinzidenz erreicht haben, wird der Schneidenton Gis als solcher hörbar und steigt dann kontinuierlich bis zum Pfeifenrohrgrundton aufwärts.

## 14. Gedackte hölzerne $d^1$-Pfeife (mit Wachskappe gedeckt).[16])

Exemplar der Staatlichen Instrumentensammlung zu Charlottenburg.

**Hierzu Kurve Nr. 14.**

Die Pfeife hat folgende Maße: Länge der Röhre: 255 mm; lichte Breite und Länge der Kernspalte: je 20 mm; Breite der Kernspalte: 1 mm; lichte Tiefe der Pfeife: 26 mm; Höhe des Aufschnitts:

[16]) Diese gedackte $d^1$-Holzpfeife war ursprünglich mit einem Holzdeckel versehen, welcher aber im Innern der Pfeife etwas unter der oberen Mündung befestigt war. Damit die Länge der offenen $d^1$-Holzpfeife mit derselben in gedacktem Zustande übereinstimme, wurde der Stempel (Deckel) entfernt und durch eine Wachskappe ersetzt.

7 mm; Höhe der Oberlippe: 16 mm; Länge des konisch nach unten verjüngten Pfeifenfußes: 19 mm; Durchmesser desselben in lichter Weite: 3 mm.

Bei langsamer Drucksteigerung von Null an setzt die Pfeife ziemlich plötzlich und laut bei 1 mm Druck mit tiefem $d^1$ ein. Bei reichlch 3 mm wird der Ton $dis^1$, dann verschwindet er plötzlich bei fast 4 mm. Es bleibt nur Blasegeräusch übrig. Erst bei einem Druck von etwa 9 mm, deutlicher bei 10 mm, tritt wieder ein Ton auf, und zwar ein tiefes $c^1$. Dieses steigt kontinuierlich, der Ton wird lauter und deutlicher; bei fast 13 mm ist er genau $cis^1$, dann hohes $cis^1$ (19 mm), hierauf — bei 30 mm — steigt der Ton noch um einige Schwingungen. Bei 40 mm wird er nahezu $d^1$. Reines lautes $d^1$ hört man bei einem Druck von 60 mm. Von 70 mm an bis 150 mm ist der Ton dauernd ein etwas hohes $d^1$. Im einzelnen ergibt sich folgendes Bild: bei 90 mm ist der Pfeifenton mit einer Edelmannschen Laufgewichtsgabel unison, die auf ein weniges unterhalb der Mitte zwischen $d^1$ und $dis^1$ eingestellt ist. Bei 100 mm Druck ist die Tonhöhe noch dieselbe; es sind keine Schwebungen zu hören. Wenn das Wassermanometer 110 mm zeigt, so sinkt der Ton auf etwas über $d^1$. Bei einem Druck von 120 mm ist der Pfeifenton ein wenig höher als $d^1$. Ebenso bei einem Druck von 130 mm. Die Überblasung in die Duodezime tritt bei 150 mm ein; der Grundton ist daneben noch hörbar, wobei seine Tonhöhe von der bei einem Druck von 130 mm festgestellten sich nicht unterscheidet.

Nach Abschluß dieser Versuchsreihe wird noch folgende Beobachtung zur Ergänzung ausgeführt: Die Pfeife wird auf schwächsten Druck eingestellt, wobei sie eben mit $d^1$ anspricht. Dann wird sie sich selbst überlassen, so daß Druck und Tonhöhe ganz allmählich abnehmen. Der Ton sinkt dabei auf $cis^1$ und verschwindet als solcher, zuletzt nur noch stoßweise hörbar. Von einer tieferen Oktave oder sonstigen Tönen ist nichts zu vernehmen.

### Zusammenfassende Erklärung.

Zweifellos ist der bei 9 bis 10 mm auftretende Ton $c^1$ (—) als Schneidenton anzusprechen, der ganz allmählich in den Resonanzgrundton übergeht. Die von diesem Tone $c^1$ (—) durch eine relativ lange Periode von Blasegeräusch getrennte Tongruppe $d^1$ (—) bis $dis^1$, welche der Druckregion von 1 bis 4 mm angehört, ist offenbar der Resonanzgrundton der Pfeife, der aller Wahrscheinlichkeit nach durch Schneidentöne in der Gegend von $d^0$ als deren Oktave hervor-

gerufen wird. Zu hören ist freilich von diesen Tönen, wohl wegen ihrer Schwäche gegenüber dem Blasegeräusch, nichts.

## 15. Dieselbe gedackte hölzerne $d^1$-Pfeife, zur offenen $d^2$-Pfeife gemacht.

### Hierzu Kurve Nr. 15.

Die Maße sind dieselben, wie die unter 14) angegebenen.

Der Ton setzt nach anfänglichem Geräusch erst bei 9 mm mit $cis^2$ ein. Bei 12 mm wird der Pfeifenton schwach und intermittierend; er ist ein hohes $cis^2$. Der Ton erlischt bei 13 mm fast vollständig; er ist nur noch hauchend und stoßweise zu vernehmen. Völliges Blasegeräusch tritt aber von 20 mm bis 30 mm Druck ein. Es scheint als ob ein hoher Nebenton sich bilden möchte. Bei einem Druck von 40 mm beginnt ein tieferer Ton ($c^2$ ?), welcher sich erst bei 44 mm deutlich als etwas tiefes $c^2$ erweist. Mitte $c^2$—$cis^2$ hört man, wenn ein Druck von 50 mm abgelesen wird. Genau $cis^2$ wird der Pfeifenton bei 80 mm, welcher bei einem Druck von 120 mm nur um ein weniges höher wird. Hohes $cis^2$ wird erst bei einem Druck von 160 und 180 mm gehört. Bei einem Druck von 330 mm zeigen sich schwebungsartige Stöße, die bei einem solchen von 360 mm wieder verschwinden. Die Überblasung tritt erst ein, wenn das Wassermanometer auf 560 mm gestiegen ist; der Grundton ist aber weiterhin schwach daneben zu hören. Er verschwindet erst bei ungefähr 650 mm Druck. Der Überblasungston ist höher als eine Gabel von 1100 Schwingungen, also ein hohes $cis^3$.

### Zusammenfassende Erklärung.

Wie bei derselben Pfeife in gedacktem Zustande bei 9 mm die hörbare Schneidentonreihe einsetzte, so ist offenbar auch hier das Einsetzen von $c^1$ die Ursache dafür, daß bei dem Druck von 9 mm die Oktavenregion $cis^2$ des Schneidentones, die zugleich den Resonanzgrundton der Pfeife bildet, auftritt. Diese Resonanz erlischt unter Intermissionen bei etwa 13 mm Druck und es erfolgt der Rücksprung in die zunächst durch Blasegeräusch verdeckte Schneidentonreihe. Erst bei 40 mm wird dieselbe wieder hörbar, und zwar auch wieder, wie bei der gedackten Pfeife, kurz vor dem kontinuierlichen Übergang in den Pfeifenrohrgrundton, nämlich mit tiefem $c^2$.

### Zusammenfassung der Versuchsergebnisse.

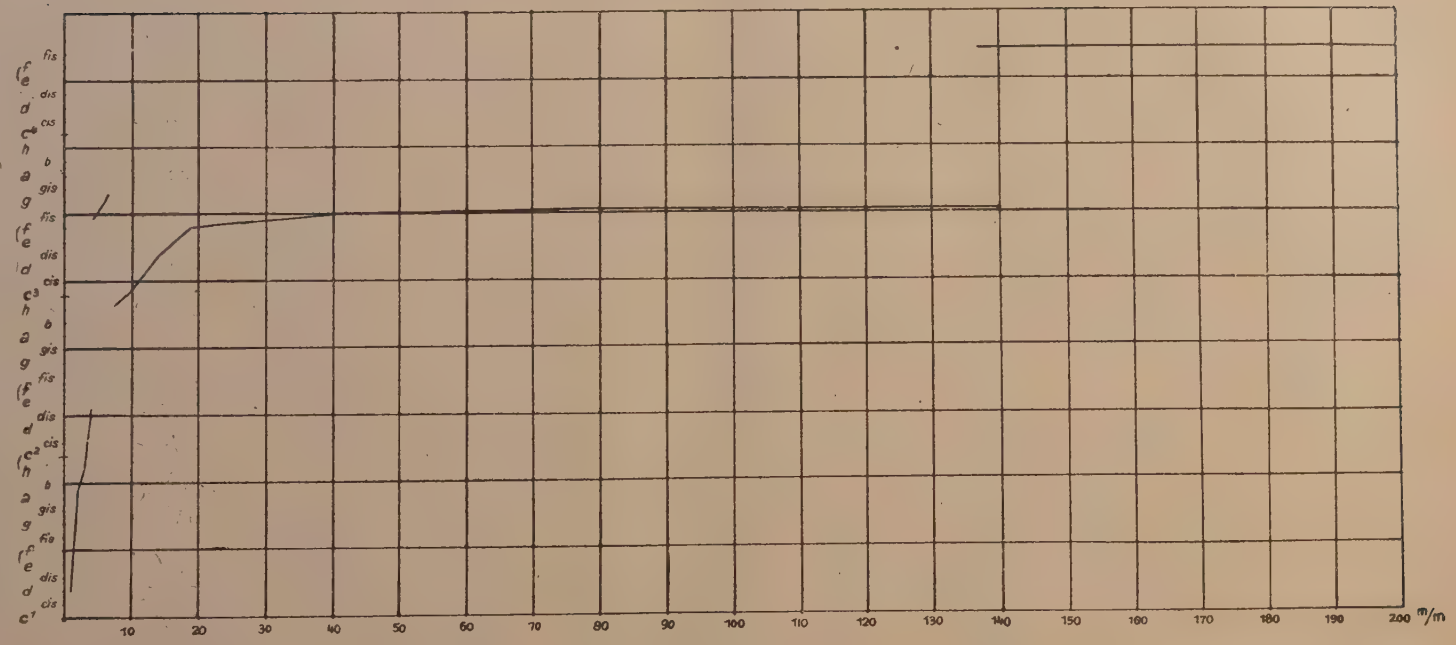
Bei einem Rückblick auf die Resultate, die durch die Untersuchungen der einzelnen Pfeifen gewonnen wurden, zeigt sich ein

durchaus einheitliches Bild. Alle zur Beobachtung gekommenen Einzelheiten betreffs der Tonbildung in Lippenpfeifen, von der großen Oktave an bis zur viergestrichenen, lassen sich zwanglos als eine Resultierende aus dem Zusammenspiel von Schneidentönen und Resonanztönen erklären. Der Schneidenton hat bei sämtlichen Pfeifen das Bestreben, aus der Tiefe herauf kontinuierlich anzusteigen, bis er dann die Höhe des Resonanzgrundtones der Pfeife erreicht. Der „Oktavensprung", welcher eintritt, wenn die Oktave des Schneidentones dem Resonanzgrundtone des Pfeifenrohres nahe kommt, ist nur ein scheinbarer; es handelt sich dabei um eine zwangsmäßige Unterdrückung des Schneidentones, die dadurch entsteht, daß die Schneidentonoktave sich dem Resonanzgrundton anpaßt, und der Schneidentongrundton sich neben der zu ihm disharmonischen Oberschwingung nicht halten kann. Durch Verlagerung oder Beseitigung des Resonanzbereiches kann man diese Art von Sprung verhüten und es dem Schneidenton ermöglichen, die kritische Stelle mit gleichmäßiger Erhöhung seiner Schwingungszahl zu durchlaufen. In anderen Fällen bleibt der Schneidentongrundton erhalten, paßt sich aber selbst der Resonanzschwingungsfrequenz an. Jede derartige Störung wird durch Geräusch oder Tonstöße gekennzeichnet, die den Umschlag begleiten, und diese Erscheinungen treten immer dann ein, wenn mit wachsender Höhe des Schneidentongrundtones dieser selbst oder einer seiner Obertöne dem Resonanzgrundtone oder einem von dessen harmonischen Obertönen nahe kommt, so daß eine Koppelung resultiert, und abermals, wenn sich später bei weiterer Steigerung der Schneidentonschwingungszahl die Koppelung wieder löst.

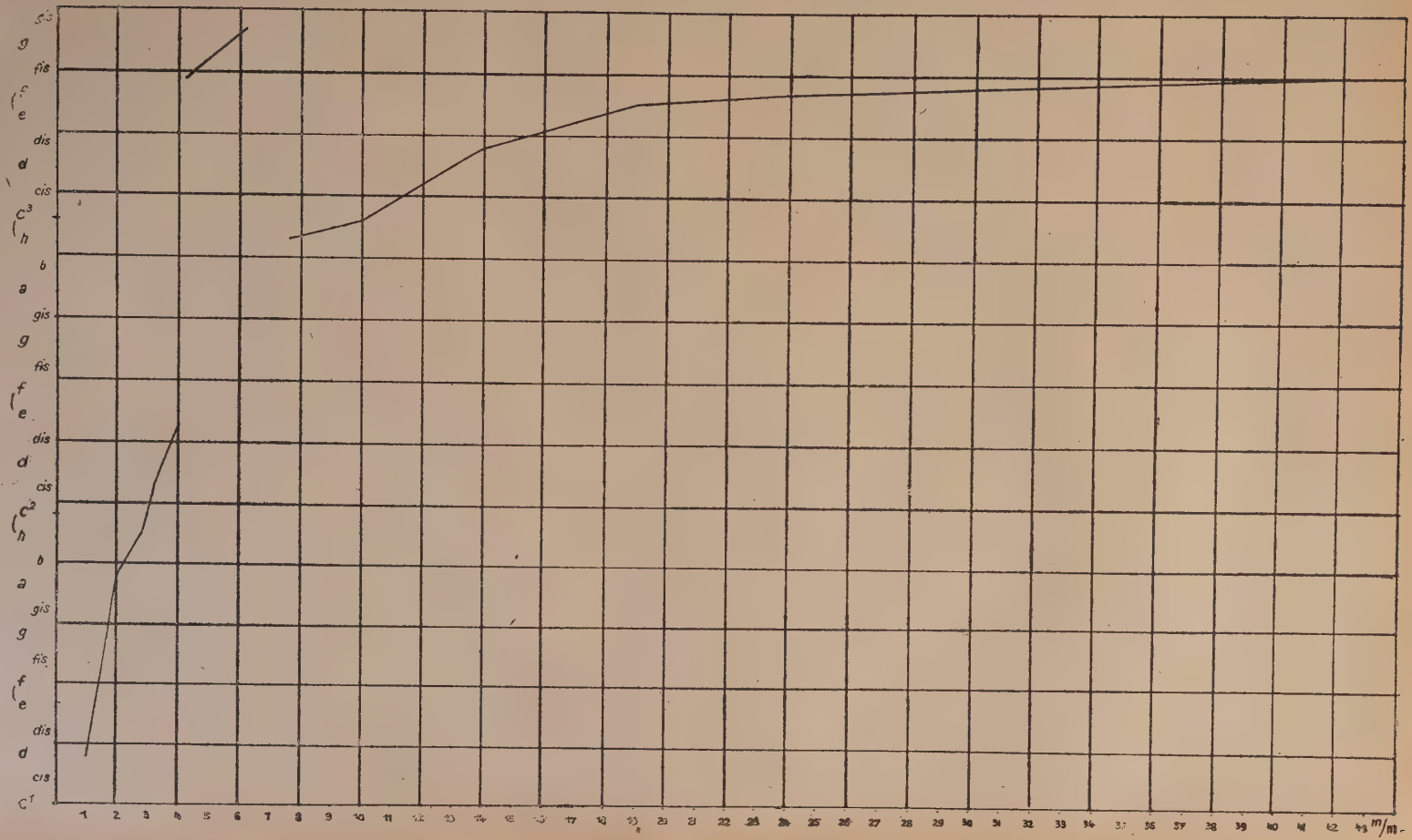
Eine Anwendung der Theorie von den erzwungenen Schwingungen auf diese Vorgänge würde vielleicht geeignet sein, dieselben noch weiter aufzuklären.

# Zinnerne $g^3$-Pfeife offen.

(Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.)

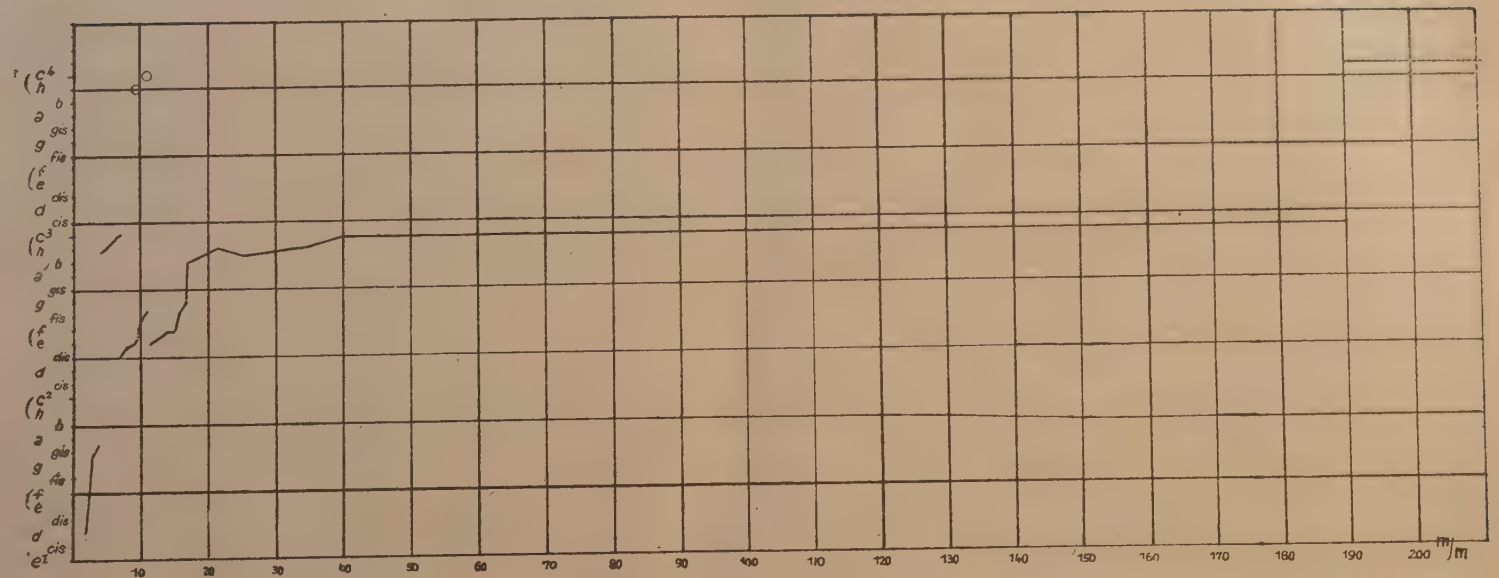


# Zinnerne $g^3$-Pfeife offen. (Vergrößert gezeichnet.)

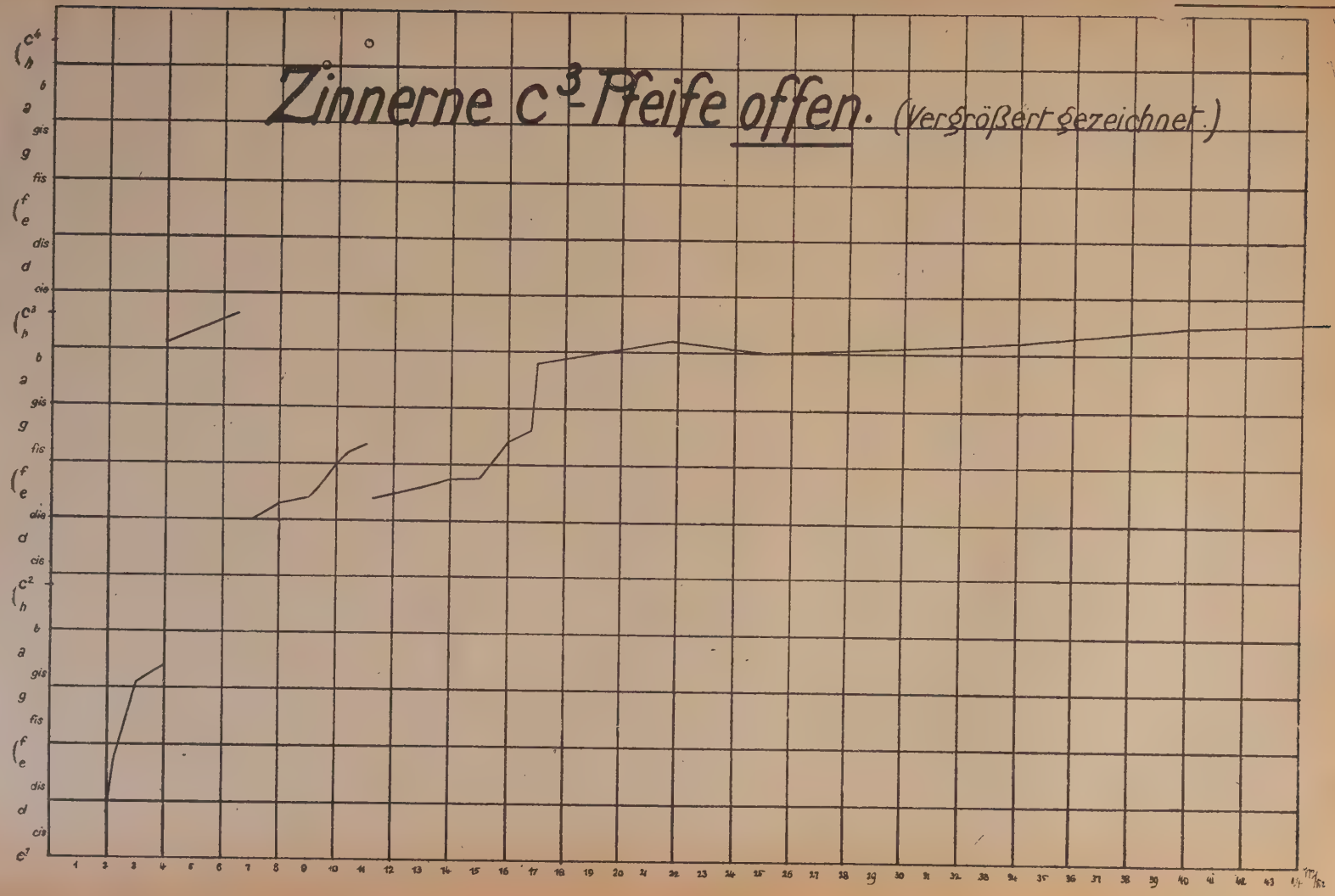


# Zinnerne $c^3$-Pfeife offen.

*(Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.)*

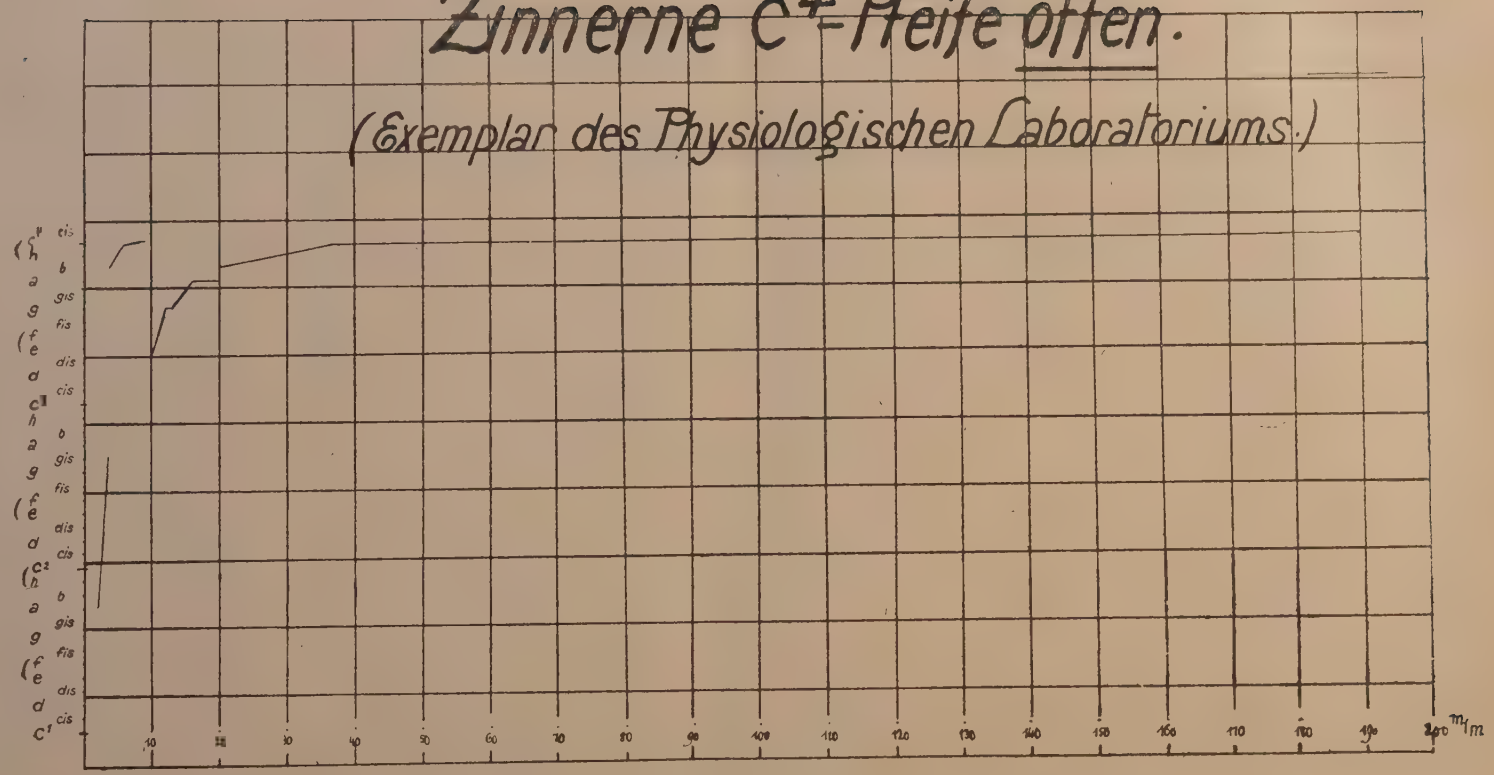


Kurve Nr. 2b.


Zinnerne c³-Pfeife offen. (Vergrößert gezeichnet.)
c⁴
h
b
a
gis
g
fis
f
e
dis
d
cis
c³
h
b
a
gis
g
fis
f
e
dis
d
cis
c²
h
b
a
gis
g
fis
f
e
dis
d
cis
c¹
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 Mm/Sec

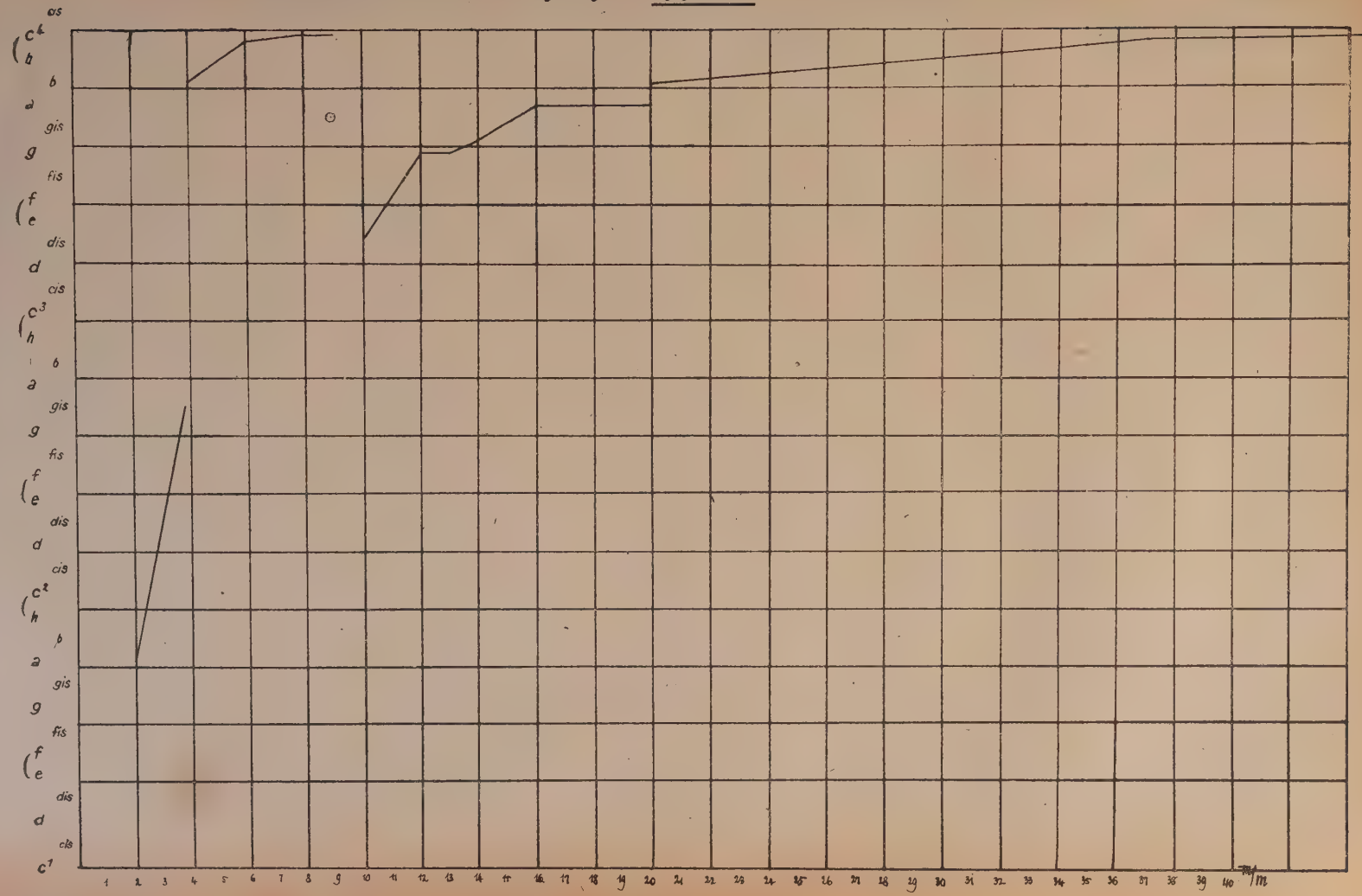
# Zinnerne $C^4$-Pfeife offen.

(Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.)



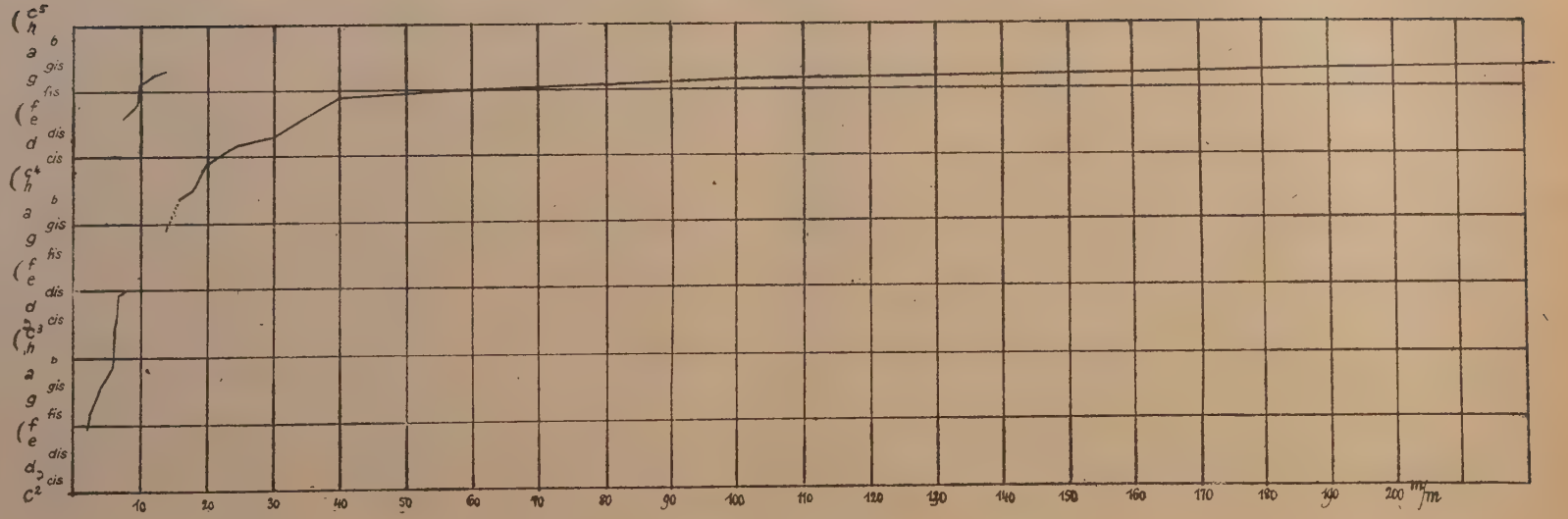
# Zinnerne $c^4$-Pfeife offen. *(Vergrößert gezeichnet.)*

Kurve Nr. 3b.

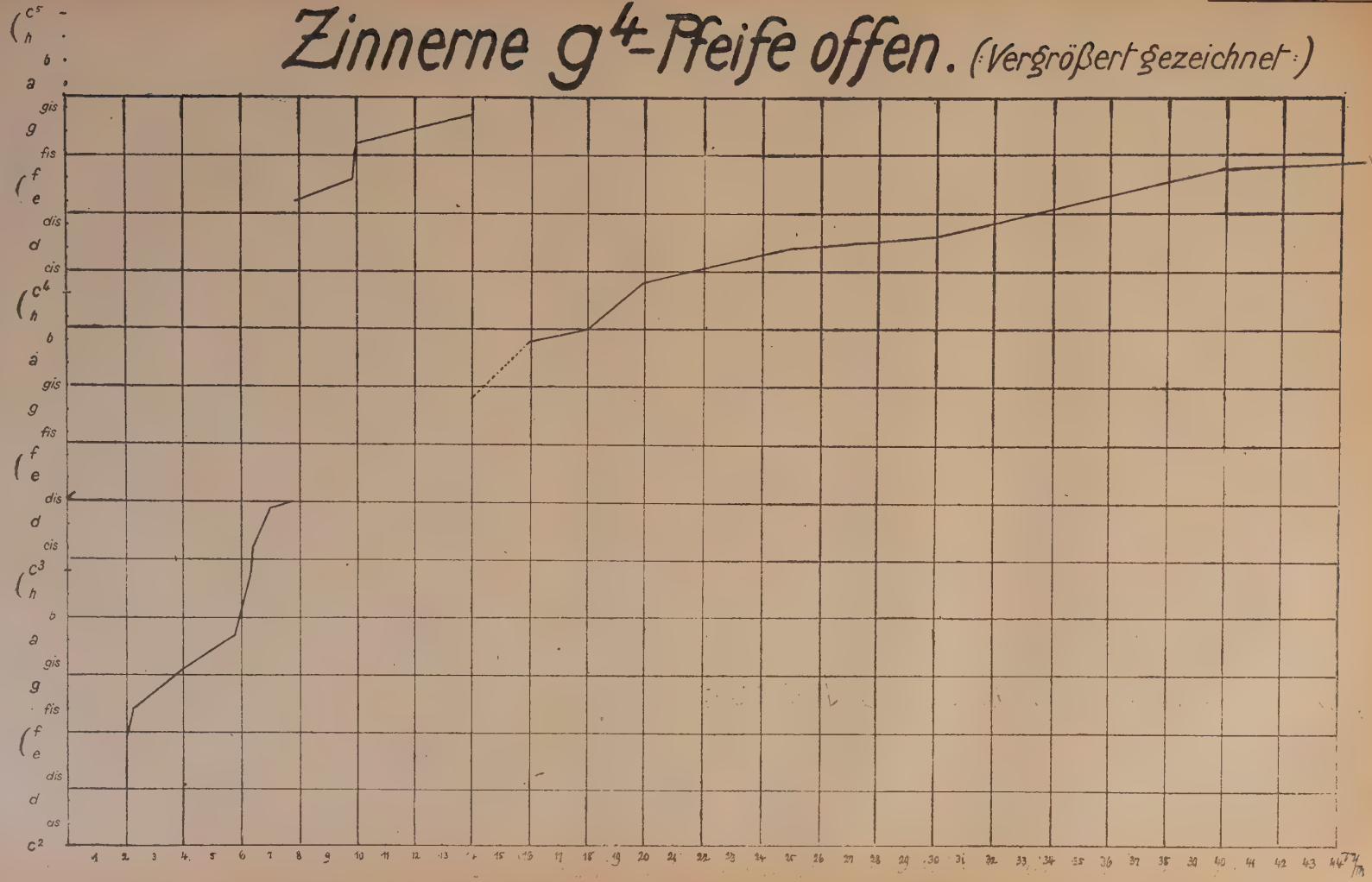


# Zinnerne $g^4$-Pfeife offen.

*(Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.)*

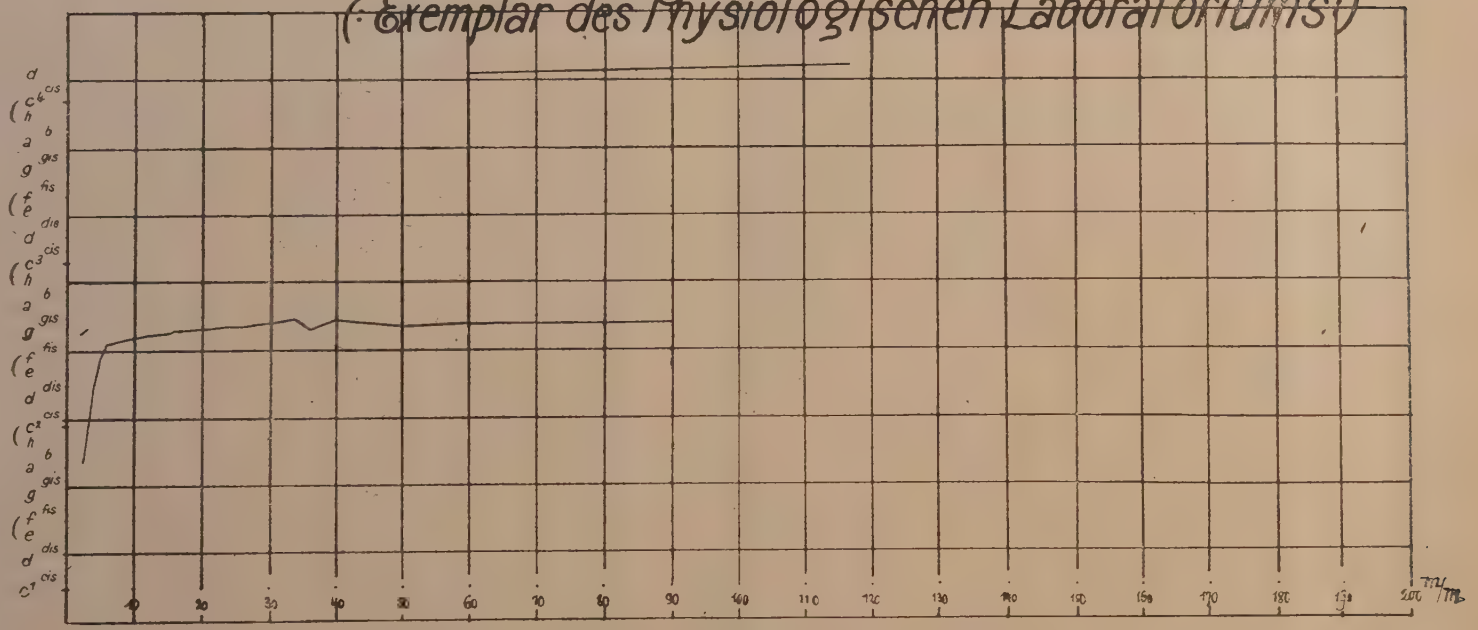


# Zinnerne $g^4$-Pfeife offen. (Vergrößert gezeichnet.)

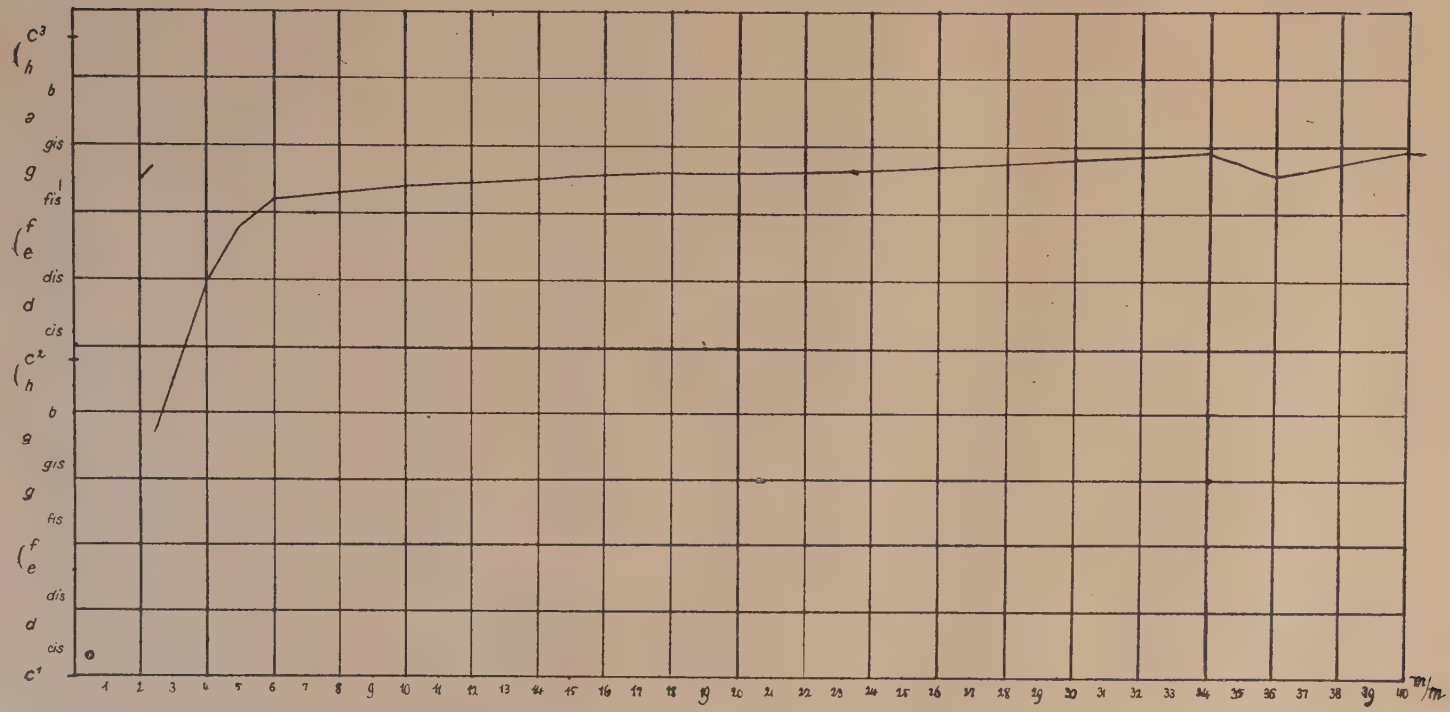


Zinnerne $g^3$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $g^2$-Pfeife gemacht.

(Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.)

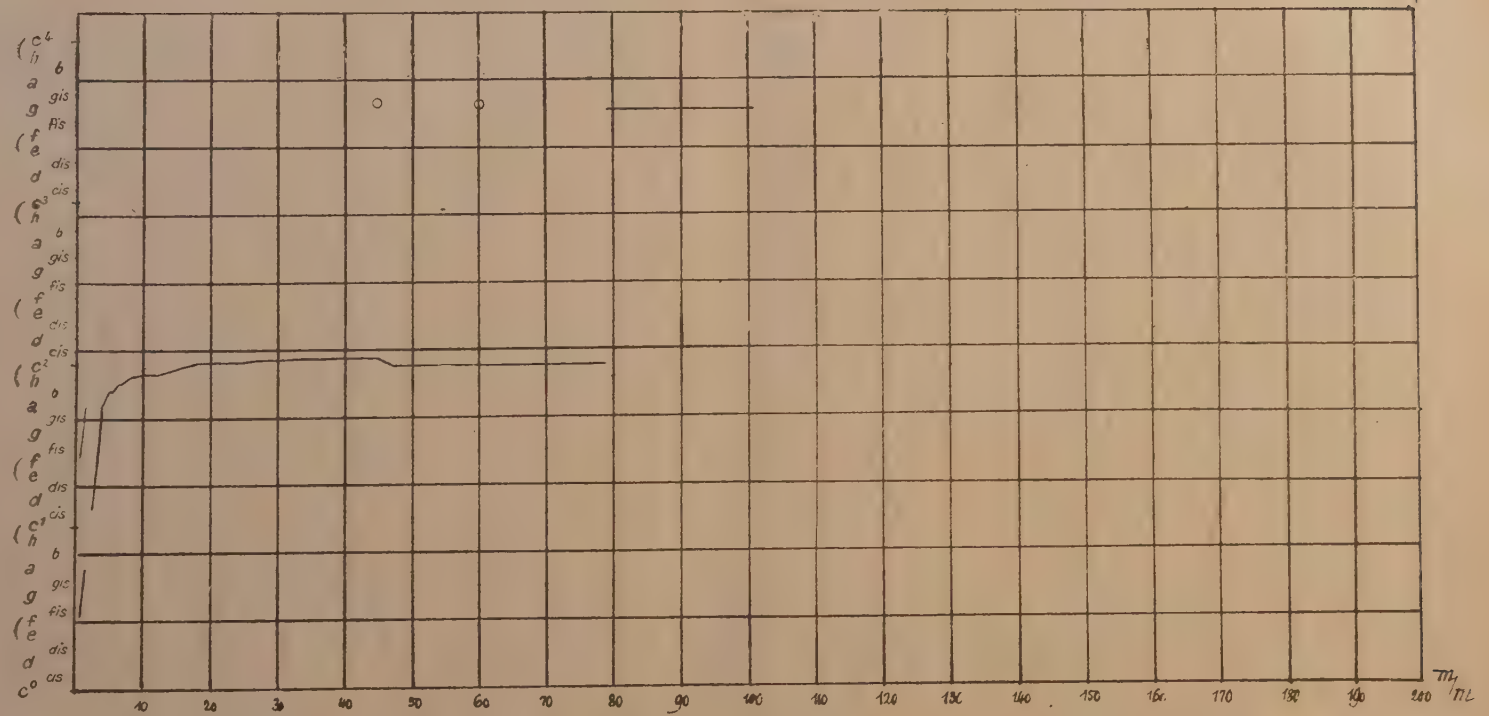


# Zinnerne $g^3$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $g^2$-Pfeife gemacht. (Vergrößert gezeichnet.)

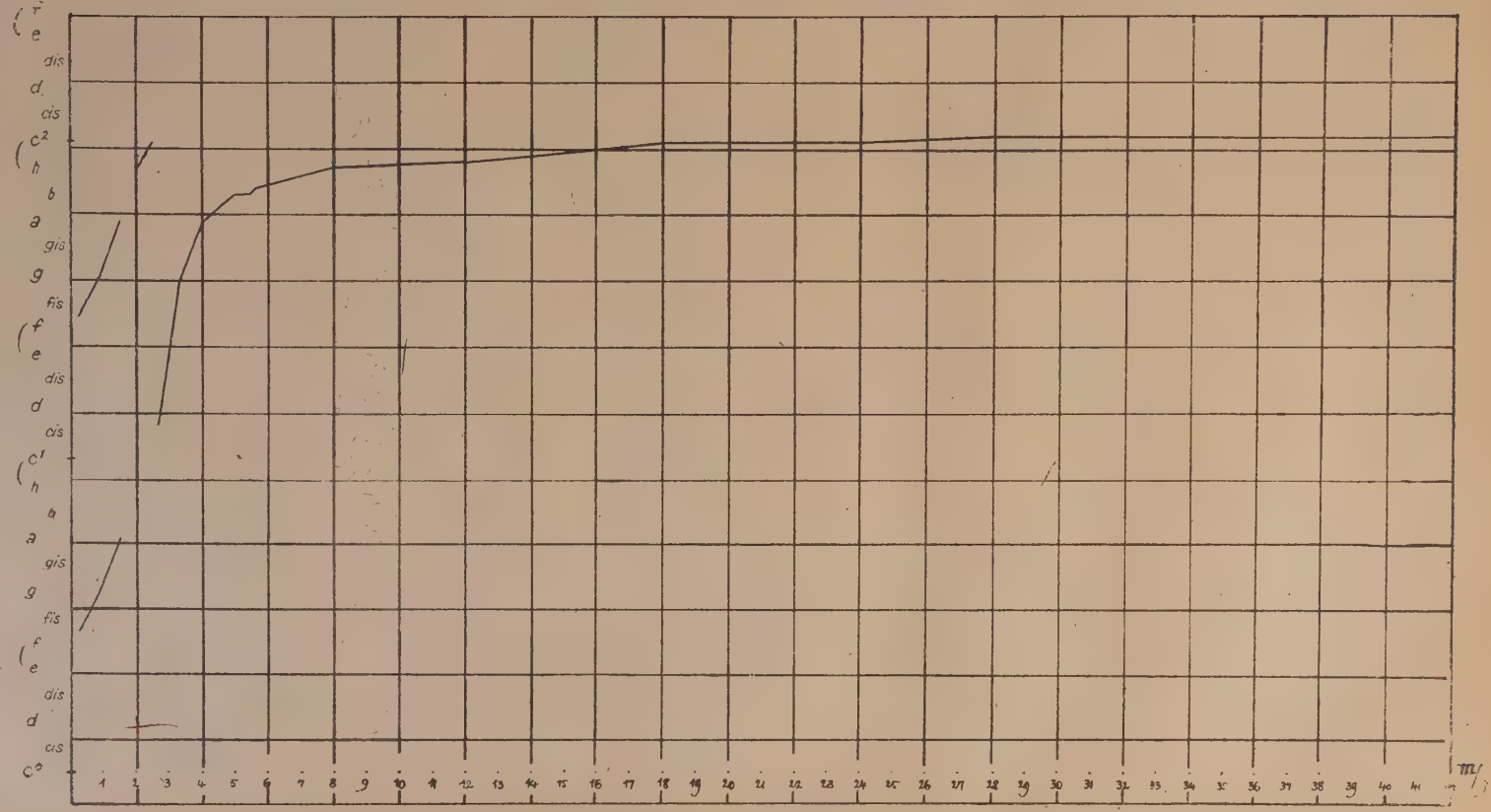


# Zinnerne $c^3$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $c^2$-Pfeife gemacht.

(Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.)

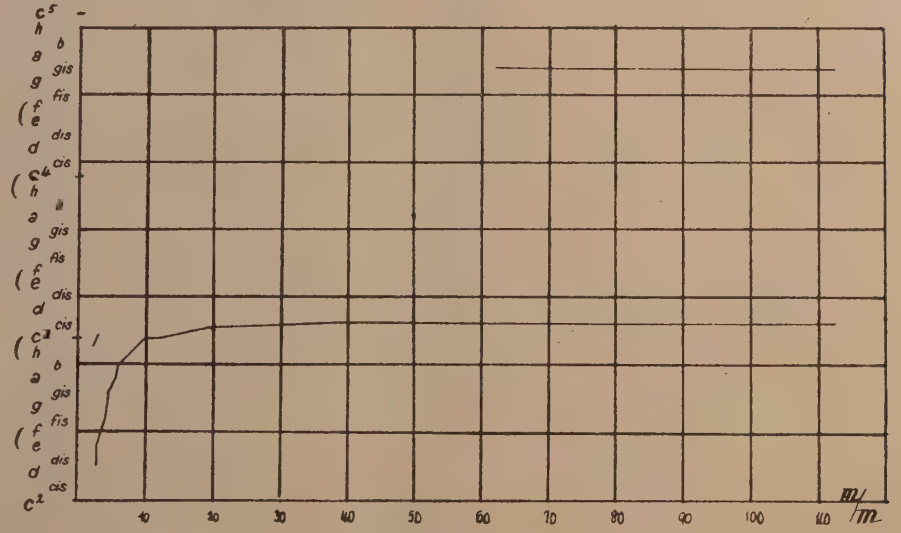


# Zinnerne $c^3$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $c^2$-Pfeife gemacht. (Vergrößert gezeichnet.)

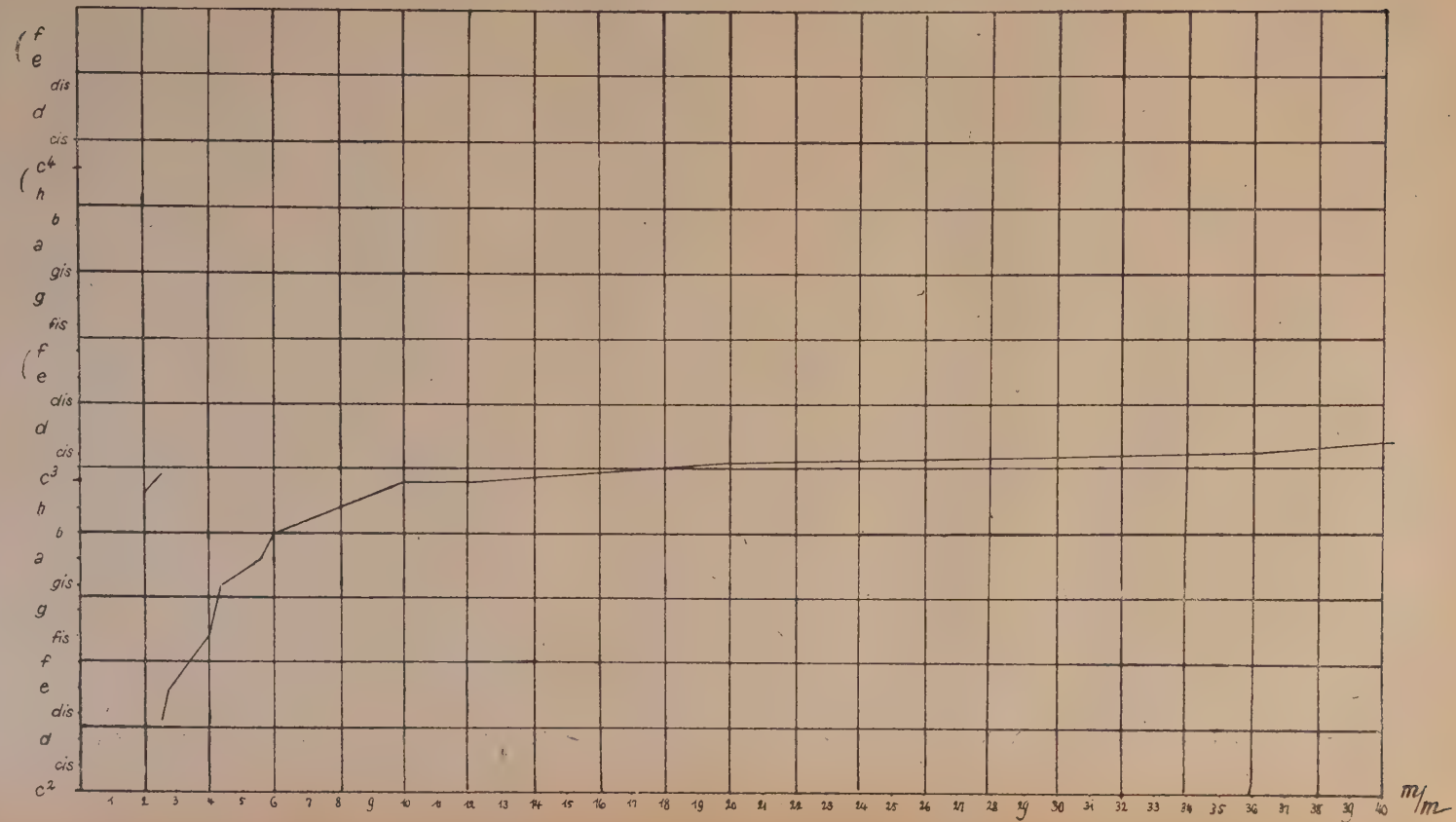


# Zinnerne $c^4$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $c^3$-Pfeife gemacht.

(Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.)

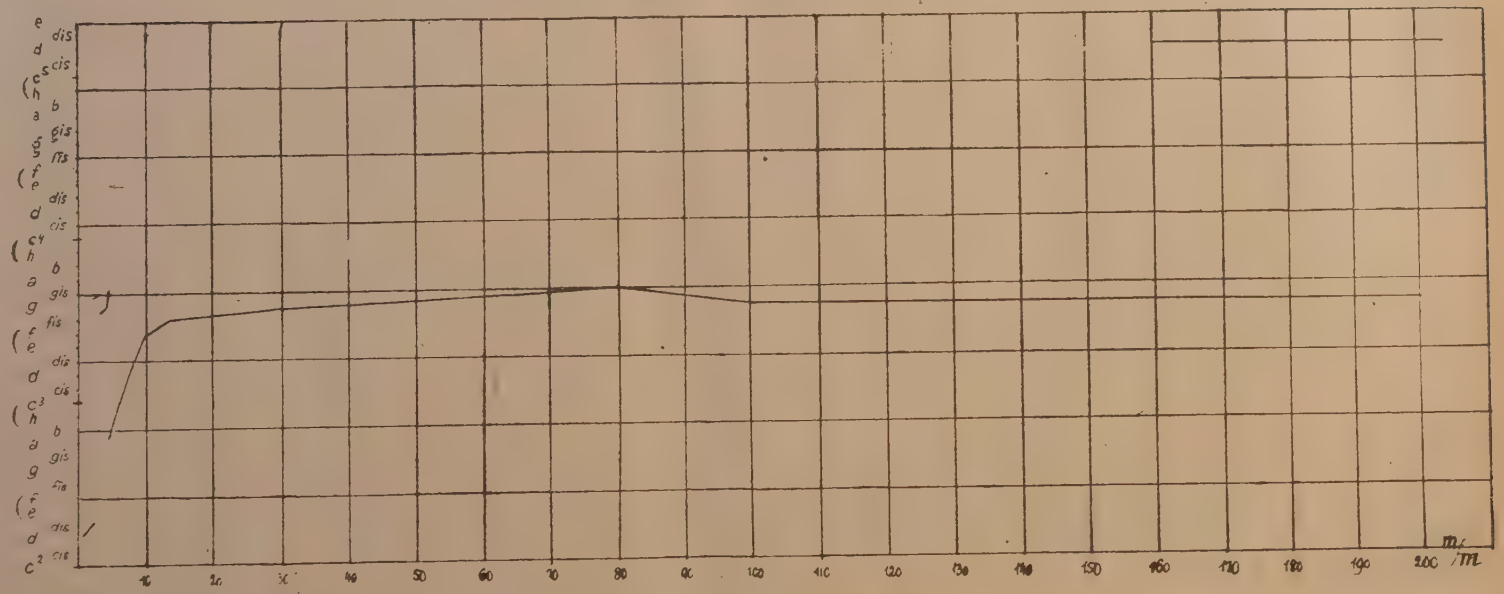


# Zinnerne $c^4$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $c^3$-Pfeife gemacht. (Vergrößert gezeichnet.)

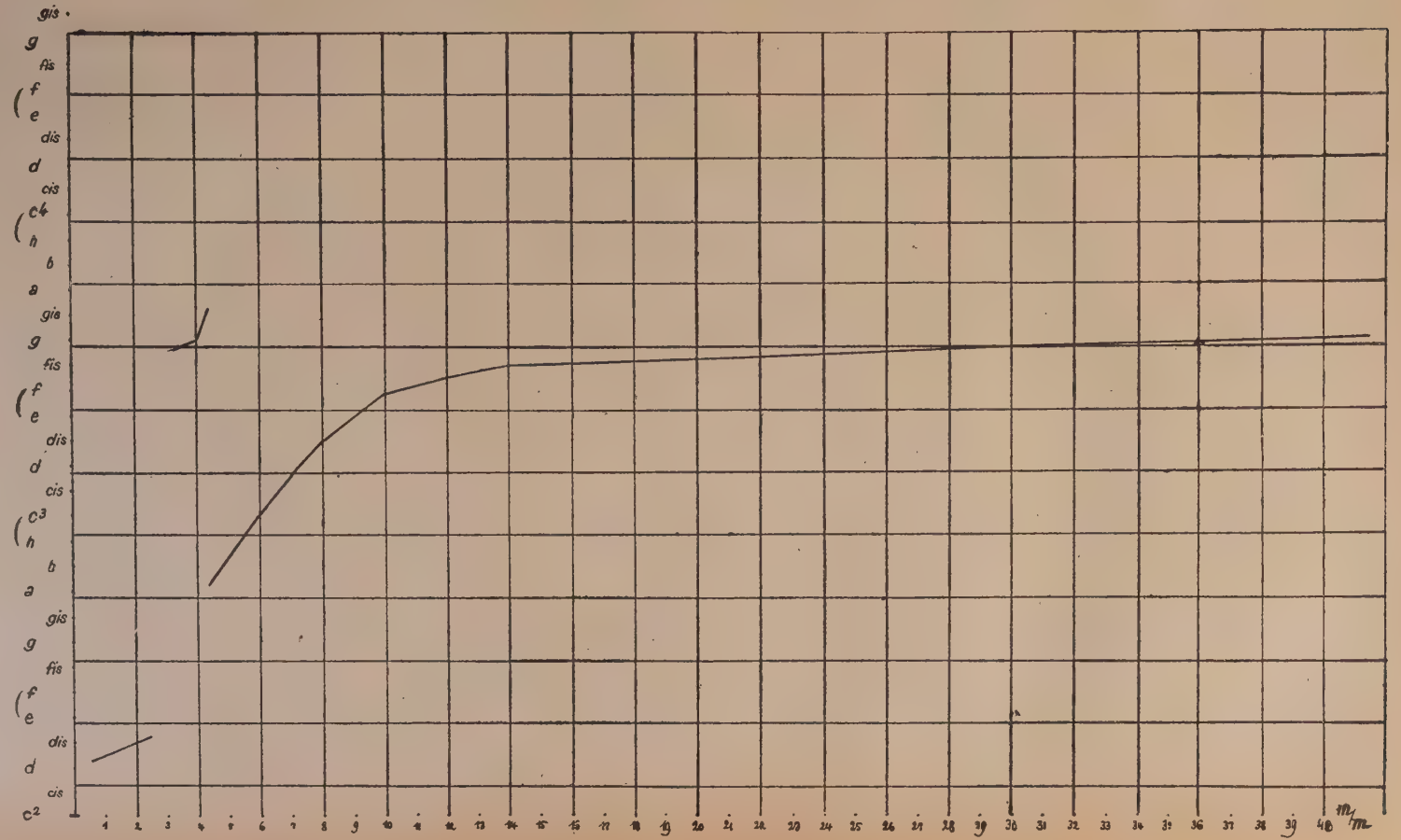


# Zinnerne $g^4$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $g^3$-Pfeife gemacht.

(Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.)

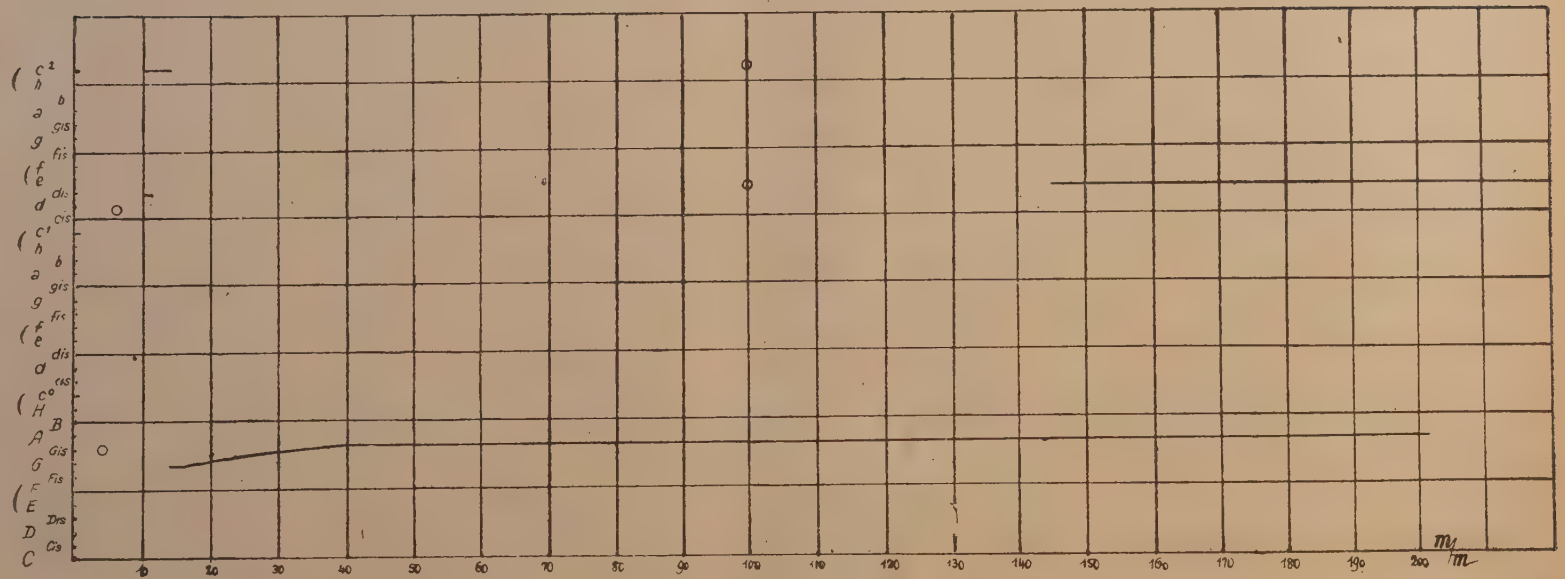


# Zinnerne $g^4$-Pfeife, durch Decken mittels Wachskappe zur $g^3$-Pfeife gemacht. (Vergrößert gezeichnet.)



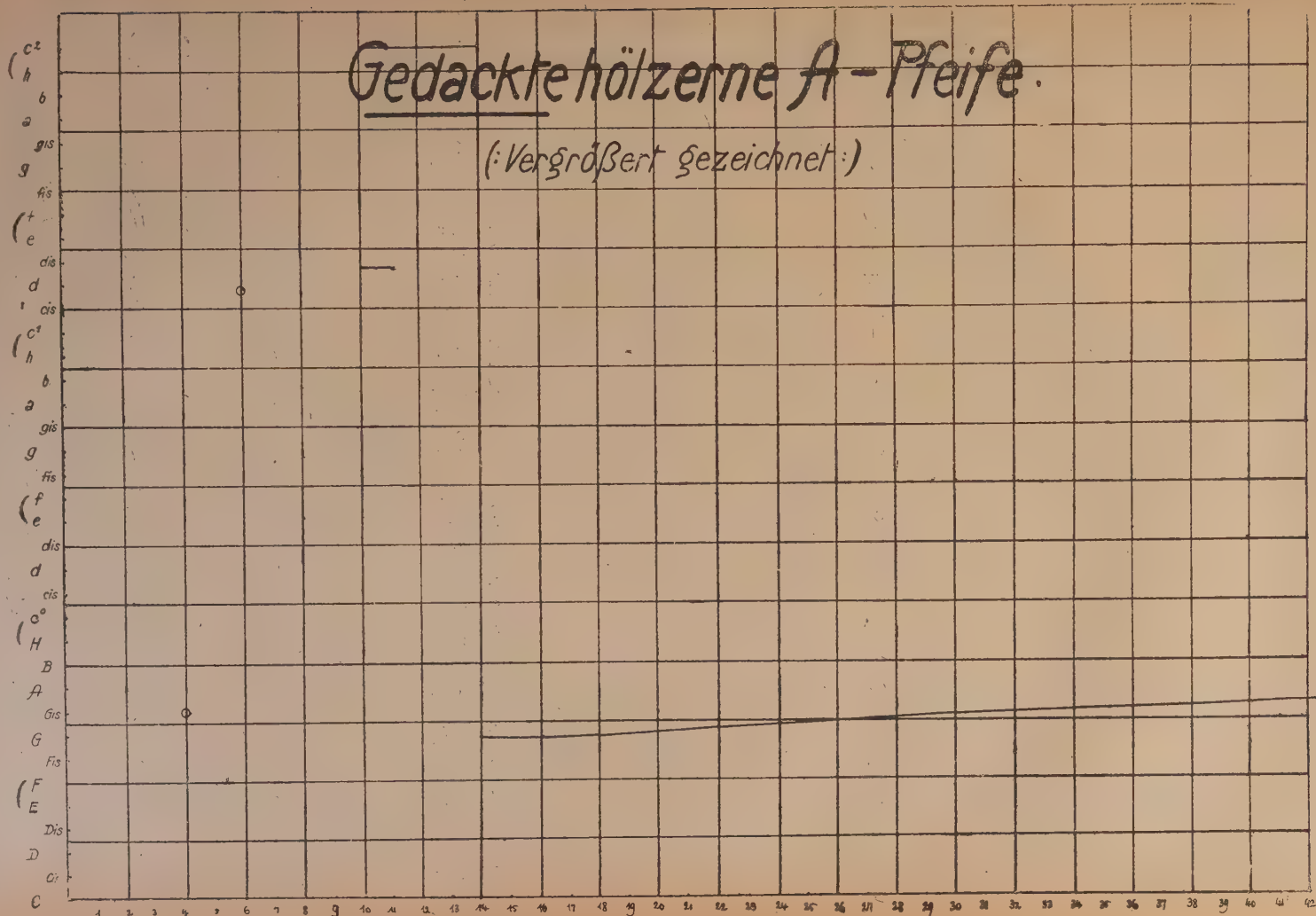
# Gedackte hölzerne A-Pfeife.

*(Exemplar der Staatl. Instrumentensammlung zu Charlottenburg.)*



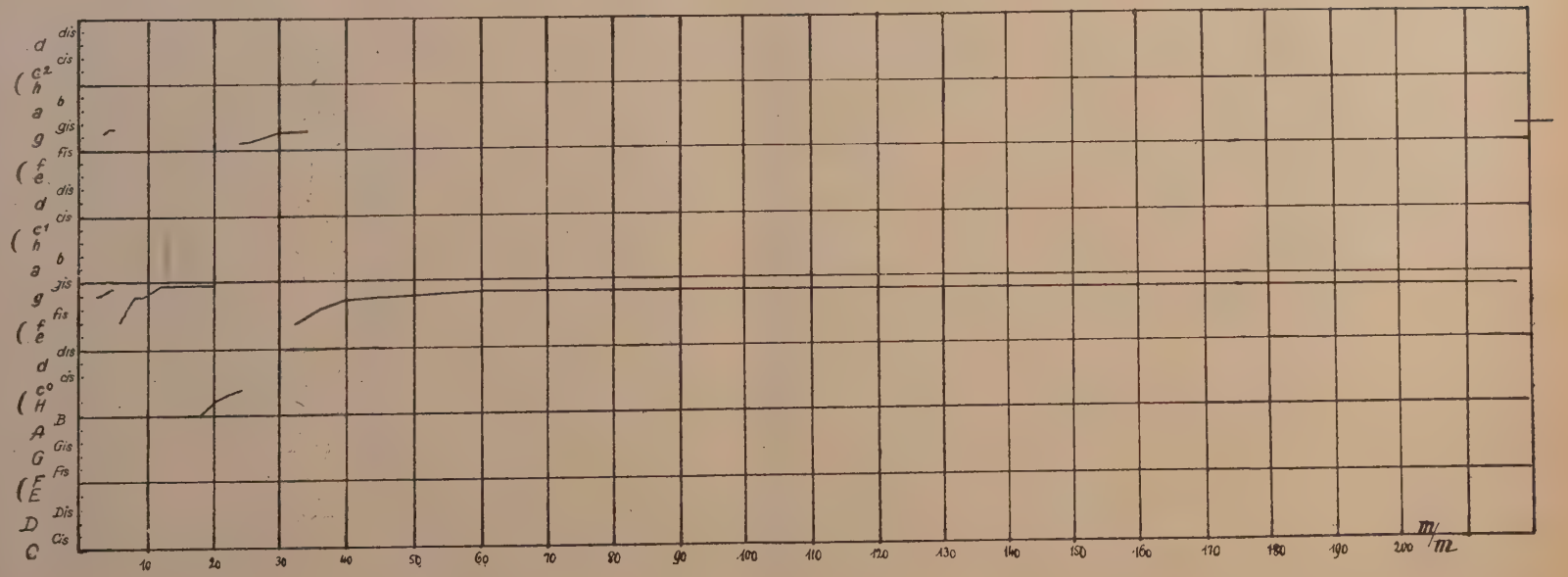
# Gedackte hölzerne A-Pfeife.

(: Vergrößert gezeichnet :)

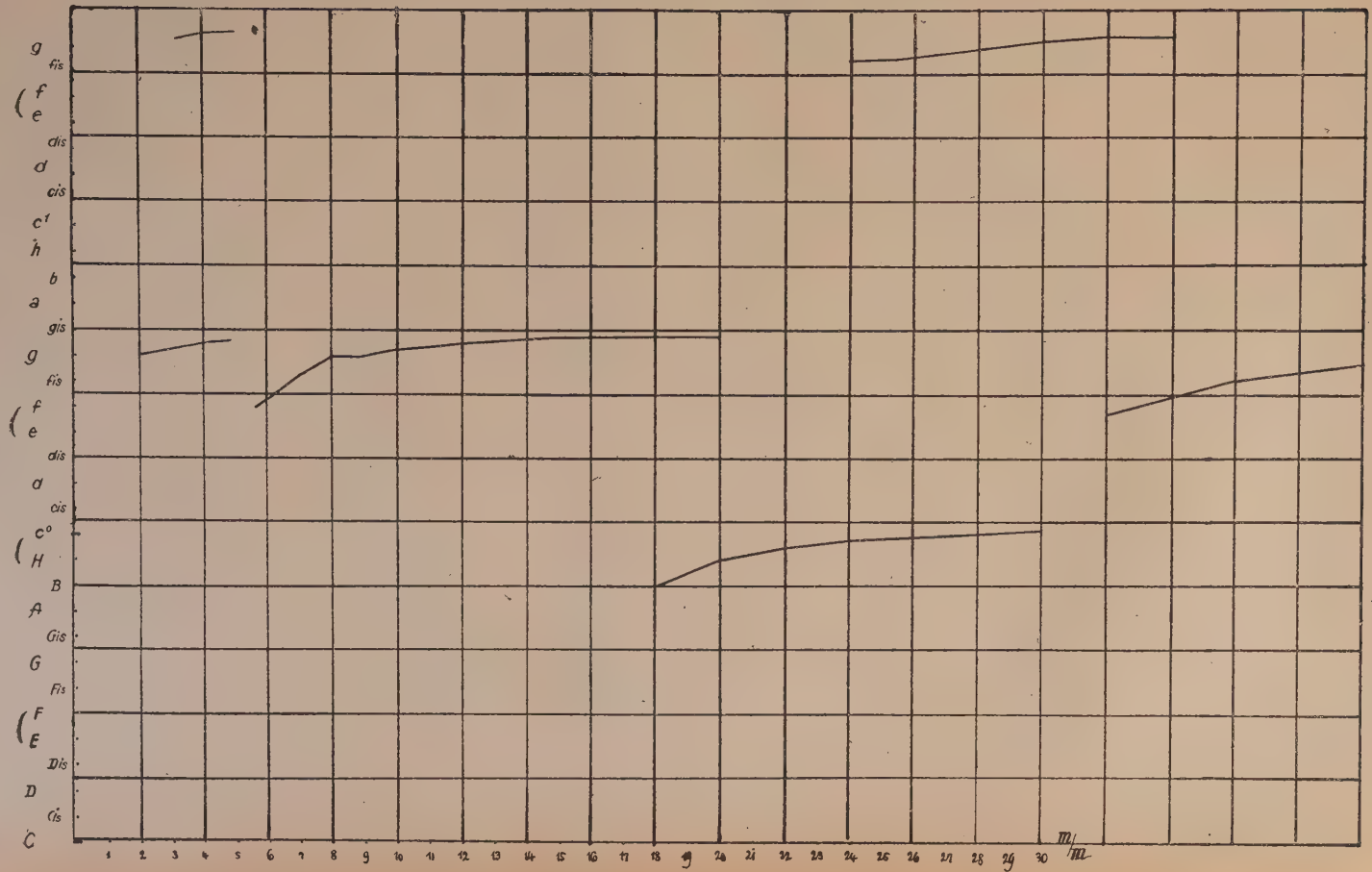


# Gedackte hölzerne A-Pfeife, durch Entfernen des Stempels zur offenen $a^0$-Pfeife gemacht.

*(Exemplar der Staatl. Instrumentensammlung zu Charlottenburg.)*

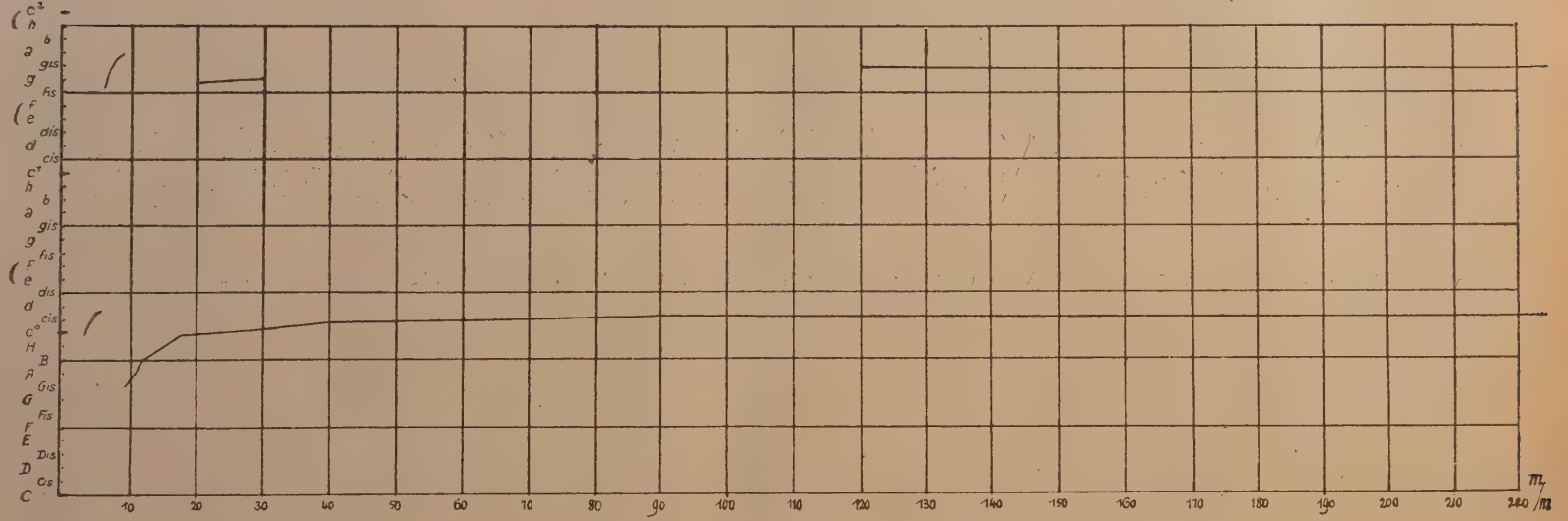


# Gedackte hölzerne A-Pfeife, durch Entfernen des Stempels zur offenen $a^0$-Pfeife gemacht. (Vergrößert gezeichnet.)

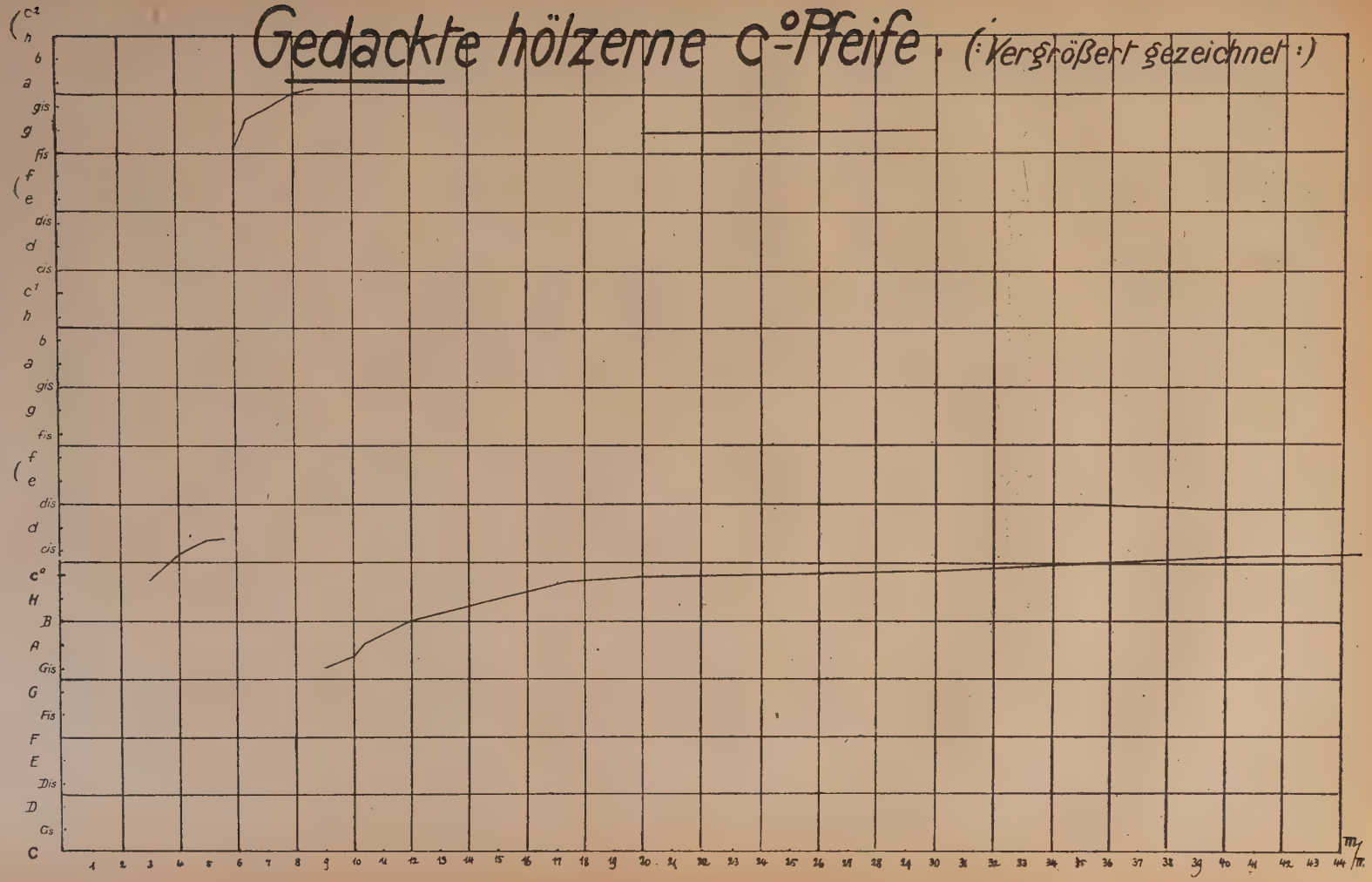


# Gedackte hölzerne $c^0$-Pfeife.

*(Exemplar der Staatl. Instrumentensammlung zu Charlottenburg.)*

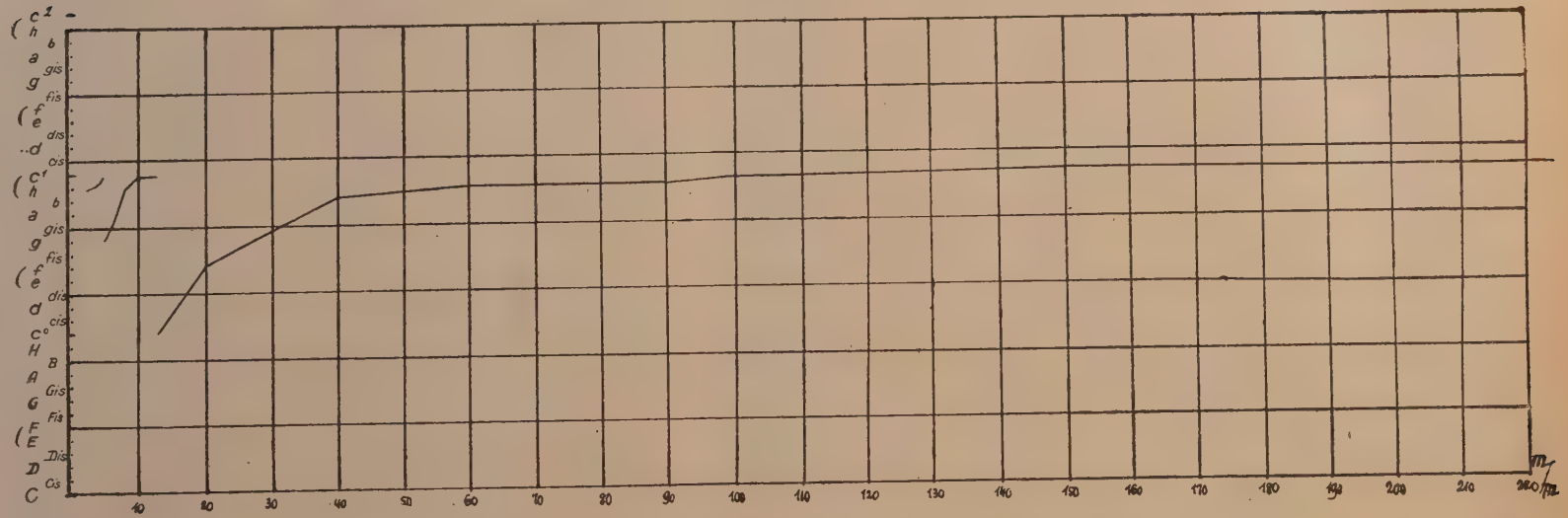


# Gedackte hölzerne C°-Pfeife. (: Vergrößert gezeichnet :)



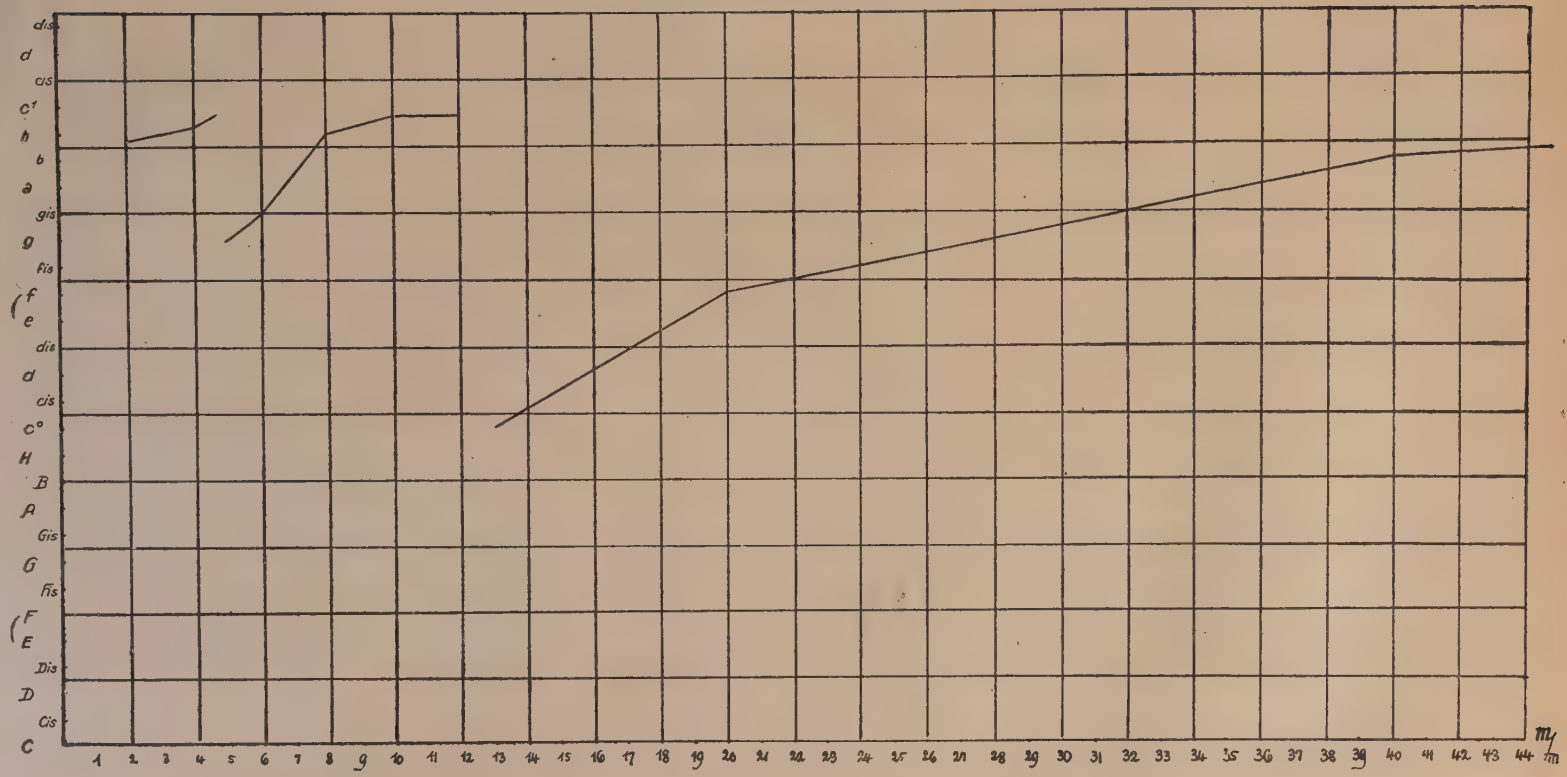
# Gedackte hölzerne $c^0$-Pfeife zur offenen $c^1$-Pfeife gemacht.

*(Exemplar der Staatl. Instrumentensammlung zu Charlottenburg.)*



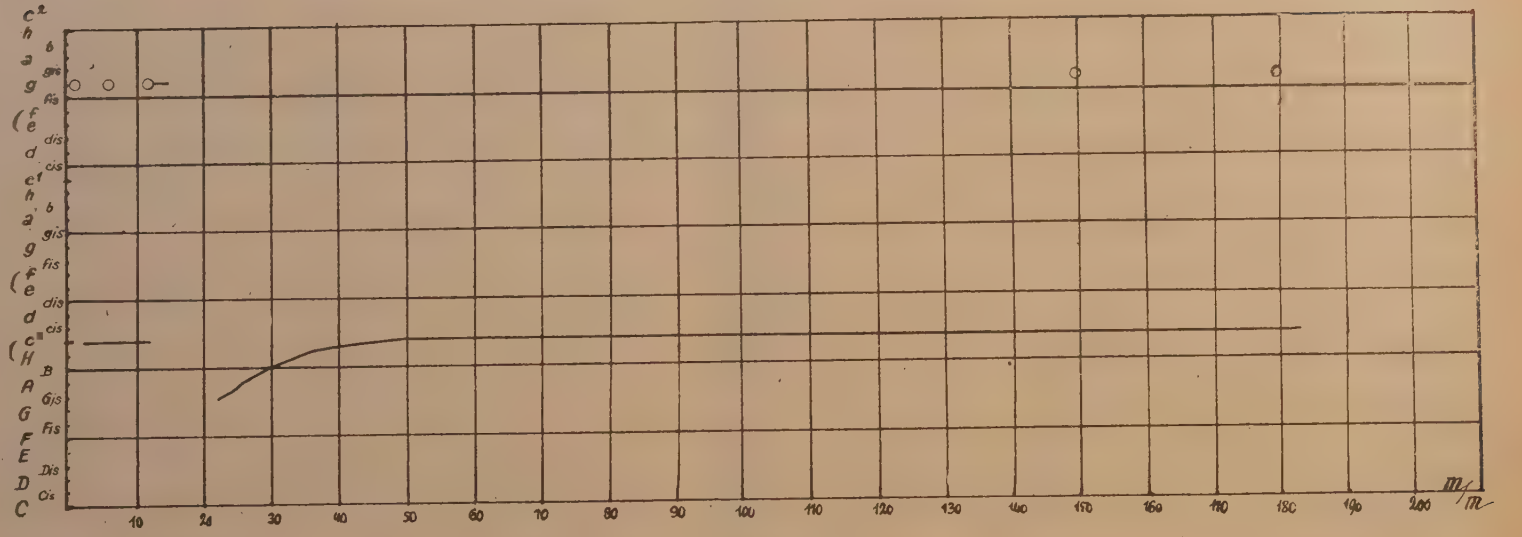
# Gedackte hölzerne $c^0$-Pfeife zur offenen $c^1$-Pfeife gemacht.

(Vergrößert gezeichnet.)

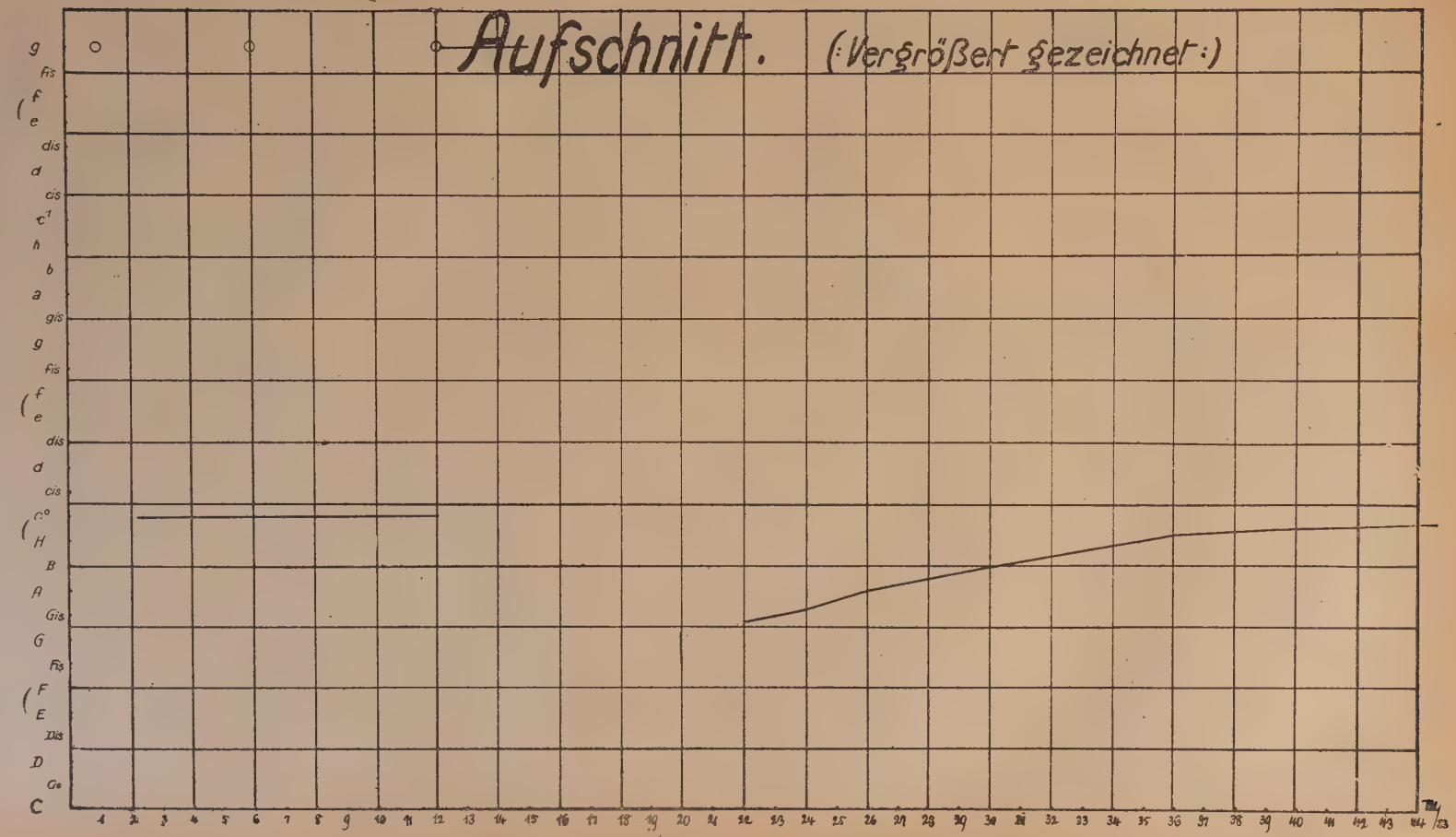


# Gedackte hölzerne $c^0$-Pfeife mit doppeltem Aufschnitt.

*(Exemplar des Physiologischen Laboratoriums.)*

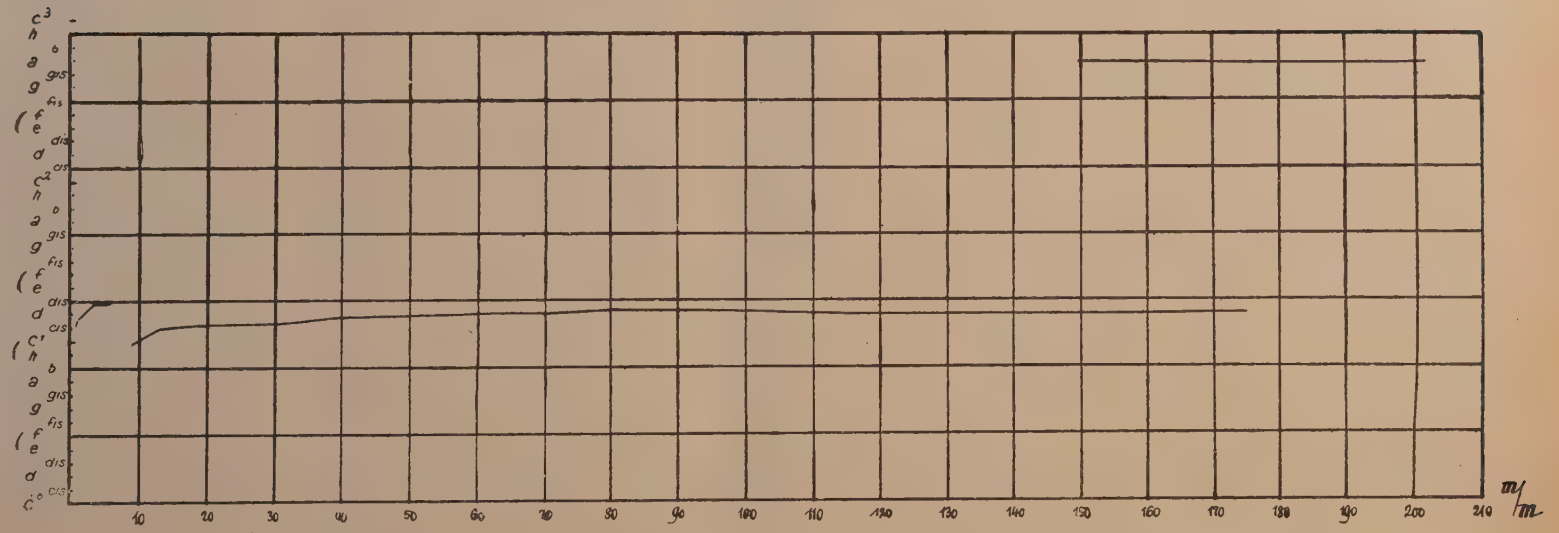


# Gedackte hölzerne $c^0$-Pfeife mit doppeltem



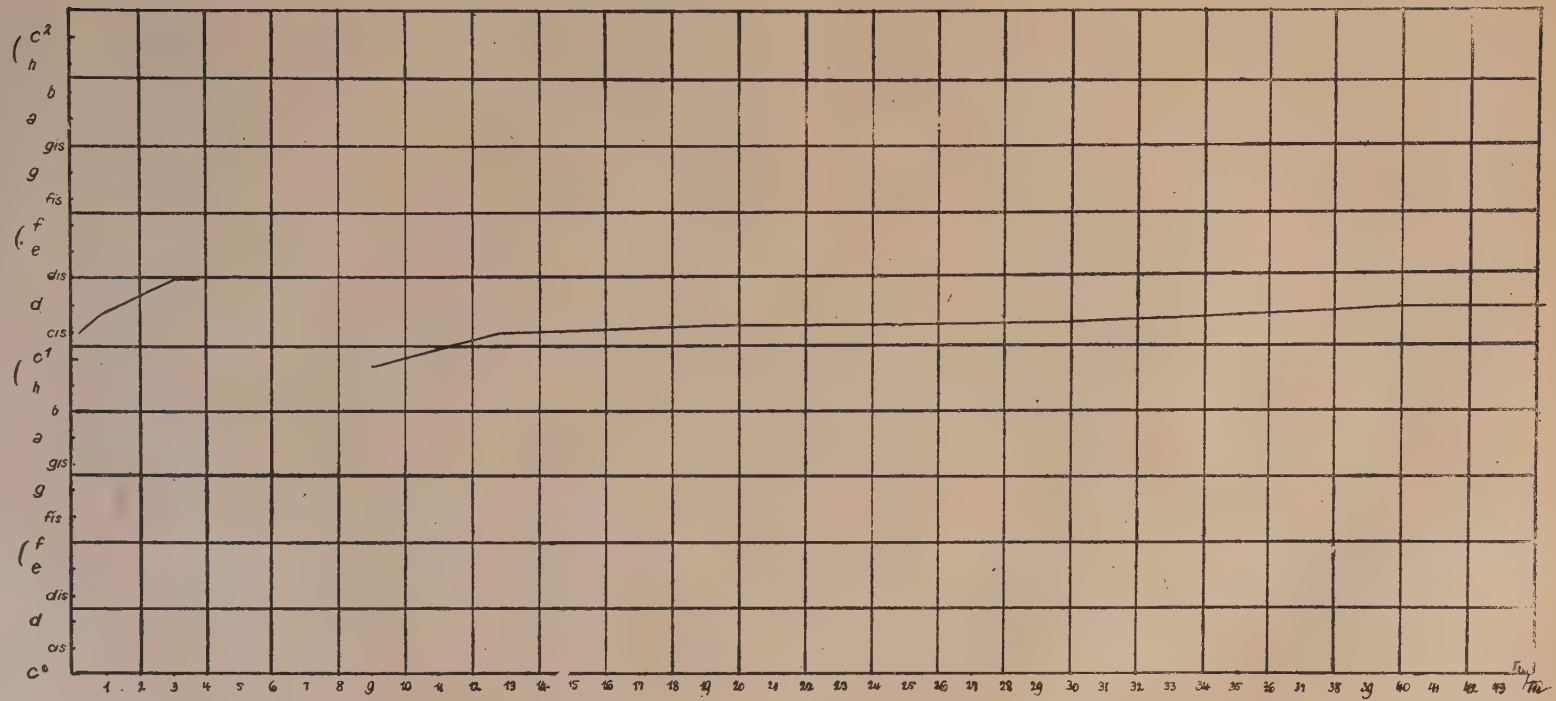
# Gedackte hölzerne d¹-Pfeife (mit Wachskappe gedackt).

(Exemplar der Staatl. Instrumentensammlung zu Charlottenburg.)



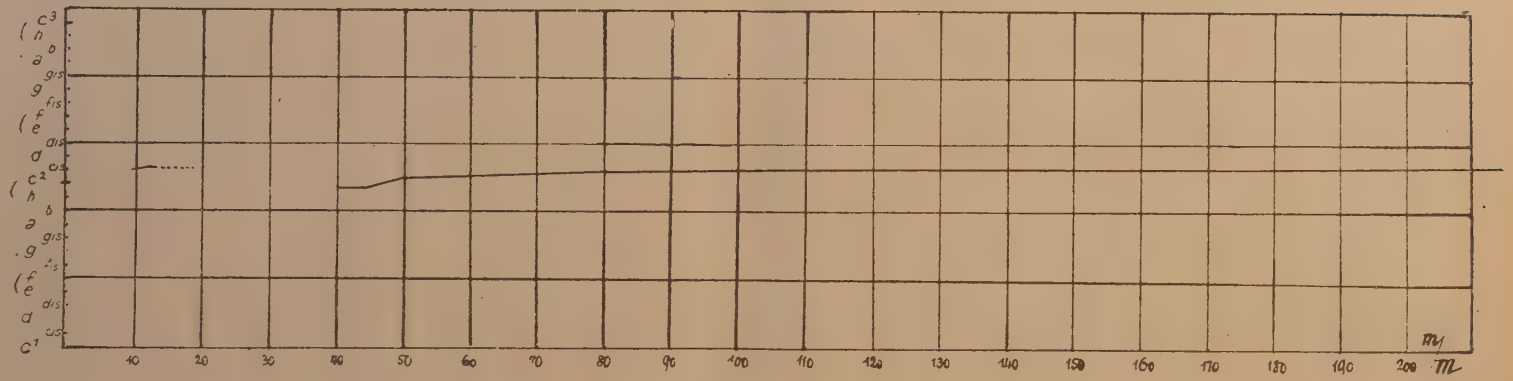
# Gedackte hölzerne d¹-Pfeife (mit Wachskappe gedackt).

(Vergrößert gezeichnet.)



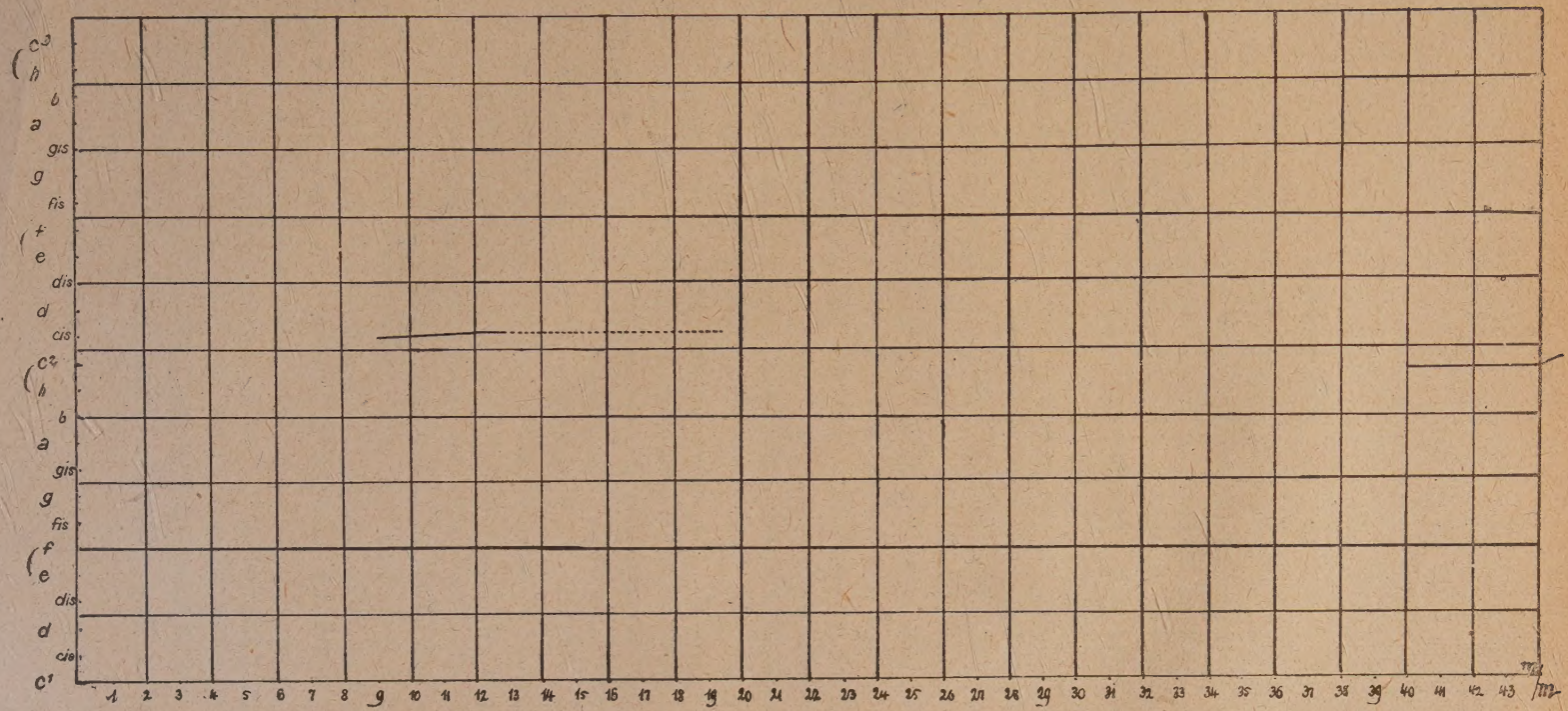
# Gedackte hölzerne $d^1$-Pfeife, zur offenen $d^2$-Pfeife gemacht.

(Exemplar der Staatl. Instrumentensammlung zu Charlottenburg.)



# Gedackte hölzerne $d^1$-Pfeife, zur offenen $d^2$-Pfeife gemacht.

(Vergrößert gezeichnet.)



## Lebenslauf.

Als Sohn des Schuhmachers Johann Adam Lutz und seiner Ehefrau Pauline, geb. Weckler, wurde ich am 25. September 1880 in Pfullingen (Württemberg) geboren und evangelisch getauft. Von 1887 bis 1889 besuchte ich die Volksschule Pfullingen, um dann bis 1897 der Oberrealschule Reutlingen anzugehören. Zur Ausbildung als Geometer war ich bis zum Eintritt in die Fachschule für Vermessungswesen in Stuttgart bei Katastergeometern tätig. 1903 legte ich die Staatsprüfung als öffentlicher Feldmesser ab und wurde im folgenden Jahre als solcher vereidigt. Bis zu meiner Anstellung als Stadtgeometer in Göppingen — welche 1907 erfolgte — war ich zur weiteren praktischen Ausbildung sowohl in Privat- als auch in Staatsstellung beschäftigt. Mit Ausbruch des Krieges meldete ich mich sofort als Freiwilliger. Ich wurde als oberer Beamter der Landesaufnahme des Großen Generalstabs mit der Triangulation der Festung Ulm und später Namur beauftragt. Zur Festlegung der für die Truppenkarten wichtigsten Punkte war ich dann an der Front tätig und mußte wegen eines bei meiner Feldtätigkeit durch Anstrengung und Erkältungen erworbenen Nierenleidens zum Stellv. Generalstab nach Berlin versetzt werden, dem ich — nach Aufenthalt in verschiedenen Lazaretten — bis zu meiner Entlassung, die am 31. Dezember 1918 erfolgte, angehörte. Da meine Krankheit der Ausübung des Geometerberufs — wegen der damit verbundenen Feldtätigkeit — ein Hindernis war, beschloß ich zu studieren und benützte die während meiner Zugehörigkeit zum Generalstab übrig bleibende freie Zeit dazu, mich auf das Abiturientenexamen vorzubereiten. Im Jahre 1917 bestand ich die Prüfung an der Königstädtischen Oberrealschule zu Berlin, um mich dann zu Ostern desselben Jahres bei der Philosophischen Fakultät der Berliner Universität immatrikulieren zu lassen. Als Hauptfach wählte ich Musikwissenschaft, als Nebenfächer Physik und Philosophie. Von Februar 1919 bis Oktober desselben Jahres mußte ich wegen meiner Krankheit das Studium unterbrechen und war zu längerem Aufenthalt in einem Sanatorium in Bayern gezwungen.

Während meiner Zugehörigkeit zur Universität zogen mich besonders akustische Probleme an; ich hatte Gelegenheit, mich bei Herrn Prof. Dr. Karl L. Schaefer besonders auf dem Gebiete des Studiums der Labialpfeifen praktisch zu betätigen.

Meine Lehrer waren die Herren Professoren: Friedländer, Kretzschmar, Riehl, Rubens, Sachs, K. L. Schaefer, Schünemann, Stumpf und Wolf.

Allen diesen Herren, besonders Herrn Prof. Dr. Karl L. Schaefer, bei dem ich weitestes Entgegenkommen fand und in dessen Laboratorium ich die Dissertation fertigte, Herrn Prof. Dr. Sachs, der mir Instrumente aus der Staatlichen Sammlung alter Musikinstrumente zu meinen Versuchen überließ und mir stets, wie auch Herr Prof. Dr. Schünemann, mit Rat zur Seite stand, und Herrn Prof. Dr. Joh. Wolf, der meinen Studiengang von Anfang an leitete, fühle ich mich zu großem Dank verpflichtet.